



Aalto-yliopisto  
Insinööritieteiden  
korkeakoulu

Veli-Heikki Pietarinen

## **Rautatietunnelin suuaukon numeerinen virtauslaskenta pakkasolosuhteissa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 19.9.2019

Valvoja: Professori Risto Kosonen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Markus Nisula

---

**Tekijä** Veli-Heikki Pietarinen

---

**Työn nimi** Rautatietunnelin suuaukon numeerinen virtauslaskenta pakkasolosuhteissa

---

**Maisteriohjelma** Sustainable Energy in Buildings and Built Environment

**Koodi** ENG3068

---

**Työn valvoja** Professori Risto Kosonen

---

**Työn ohjaaja(t)** Diplomi-insinööri Markus Nisula

---

**Päivämäärä** 19.9.2019

**Sivumäärä** 96

**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Junatunneleissa ilman virtausolosuhteet poikkeavat huomattavasti tavanomaisista kiinteistöistä. Suomessa Tunnelien suunnittelussa on huomioitava kylmän pakkasilman virtaus tunneliin ja siitä aiheutuva tunnelin jäätymisriski. Tunneleiden ilmanvaihdon suunnittelussa on käytetty jo kauan yksiulotteista virtaussimulointia. Toisaalta myös kolmiulotteinen simulointi ja siihen liittyvät tutkimukset ovat lisääntyneet samalla, kun mallinnukseen käytettävät ohjelmat ovat parantuneet ja laskennan kustannukset ovat laskeneet. Kolmiulotteisella virtausmallinnuksella tunnelin ilmanvaihdon suunnittelija voi tutkia ja varmistaa suunnitelmien toimivuutta yksittäisissä kohdissa, joissa yksiulotteisten simulointien luotettavuus ei ole riittävä.

Tässä diplomityössä tutkittiin junatunnelin suuaukon virtausmallinnusta liittyen Pissararata-hankkeeseen. Pissararadan tunnelin suuaukoilla kaksi yksittäistä tunnelia yhdistyvät lyhyeksi tuplatunneliosuudeksi. Työssä tutkittiin Autodesk CFD virtausmallinnusohjelmistolla kiertääkö lämmin ilma näiden kahden yksittäisen tunnelin välillä tuplaratatunnelissa pakkasolosuhteissa. Työssä hyödynnettiin lähtötietoina aikaisempia yksiulotteisia simulointeja, josta tunnistettiin sopivat simulointitilanteet ja reunaehdot kolmiulotteisille simuloinneille. Työn validointina simuloitiin aikaisempaan tutkimukseen liittyvä kohde, josta oli saatavilla kokeellista mittaustietoa.

Validointitutkimuksen simulaatioiden tulokset eivät vastanneet täysin kokeellisesti mitattuja arvoja, mutta seurasivat laadullisesti oikein junan aiheuttamaa paineen ja nopeuden kehitystä tunnelissa. Pissararataan liittyvissä simuloinneissa huomattiin, että ilma kiertää kahden yksittäisen tunnelin välillä oikeanlaisissa olosuhteissa. Kylmää ilmaa virtaa kuitenkin tunneliin junien ajaessa sieltä sisään ja ulos. Ilman kiertämiseen voidaan vaikuttaa ohjaamalla yksittäisten tunneleiden ilmavirtoja, mutta varmin keino ehkäistä jäätymisestä koituvat haitat on tunnelin riittävä eristäminen.

---

**Avainsanat** Virtauslaskenta, Ilmavirtaus, Ilmanvaihto, Pissararata, Junatunneli

---

<b>Author</b> Veli-Heikki Pietarinen		
<b>Title of thesis</b> CFD modelling of a railway tunnel opening under cold weather conditions		
<b>Master programme</b> Sustainable Energy in Buildings and Built Environment		<b>Code</b> ENG3068
<b>Thesis supervisor</b> Professor Risto Kosonen		
<b>Thesis advisor(s)</b> Markus Nisula, Master of Science (Technology)		
<b>Date</b> 19.9.2019	<b>Number of pages</b> 96	<b>Language</b> Finnish

### Abstract

The airflow conditions in train tunnels are significantly different from conventional real estate. In Finland, the design of tunnels must consider the flow of cold air into the tunnel which poses the risk of freezing the tunnel. One-dimensional flow simulation has long been used in tunnel ventilation design. On the other hand, 3D simulation and related studies have also increased as the software used for modeling has improved and the cost of computing has decreased. With three-dimensional flow modeling the tunnel ventilation designer can investigate and verify the functionality of the design plans at single points where the reliability of one-dimensional simulations is not sufficient.

This master's thesis investigated the flow modeling of the train tunnel portal in connection with the Pisara railway tunnel project with CFD (Computational Fluid Dynamics). At the portal of the tunnel, two individual tunnels combine to form a short double tunnel section. This work investigated with Autodesk CFD flow modeling software whether warm air circulates between the two individual tunnels at the double tunnel section under cold climate conditions. In the thesis, previous one-dimensional simulations were used as initial data from where suitable simulation situations and boundary conditions for three-dimensional simulations were identified. Experimental data from a previous CFD study was used to validate the train induced flow phenomena studied in this thesis.

The simulations made with Autodesk CFD did not fully correspond to the experimentally measured values but were qualitatively correct for train pressure and speed developments caused by a moving train in the tunnel. Simulations related to the Pisara railway tunnel showed that air circulates between two individual tunnels when the conditions are right. However, cold air flows into the tunnel as trains drive in and out. Air circulation can be induced by controlling the airflow of the individual tunnels before the double tunnel section but still the safest way to prevent the effects of freezing is to use adequate thermal insulation.

---

**Keywords** CFD, Airflow, Ventilation, Pisara, Railway Tunnel

---

## Alkusanat

*Granlund Oy oli mukana Pissararadan hankesuunnitteluvaiheessa. Suunnittelun aikana tunnistettiin tarve CFD simuloinneille, joiden tuloksilla voitaisiin tukea hankesuunnitteluvaiheessa tehtyjä yksiulotteisia simuloiteja. Kolmiulotteisten simulointien tekeminen kirjattiin lisäselvitykseksi, joka suoritetaan, kun hanke mahdollisesti jatkuu. Mielenkiinto projektia kohtaan on Granlund Oy:llä kuitenkin säilynyt, jonka vuoksi aiheesta päätettiin teettää tämä diplomityö.*

*Haluan kiittää työn liikkeelle lähtemisestä, aiheen ideoimisesta ja kannustuksesta Paavo Tikkasta ja Anssi Leppäahoa. Kiitos EQUA Simulation AB:n Per Sahlinille, joka todella ystävällisesti toimitti tässä työssä käytetyt lähtötiedot projektin aikaisista simulaatioista. Kiitoksia Markus Nisulalle työn ohjaamisesta ja työn valvojalle Risto Kososelle.*

*Kiitos Aino, kun jaksoit ja kannustit.*

Espoo 19.9.2019

Veli-Heikki Pietarinen



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo .....	1
Merkinnät .....	2
Lyhenteet .....	4
1 Johdanto .....	5
2 Rautatietunnelit .....	6
2.1 Yleisesti tunneleista .....	6
2.2 Vesi- ja viemärijärjestelmät .....	9
2.3 Lämmitys ja jäähdytys .....	11
2.4 Ilmanvaihto .....	13
2.5 Palontorjunta .....	17
3 Numeerinen virtauslaskenta .....	19
3.1 Yleisesti .....	19
3.2 Virtauksen perusominaisuudet .....	21
3.3 Hallitsevat yhtälöt .....	27
3.4 Turbulenssi .....	29
3.5 Rajakerros .....	33
3.6 Geometrinen malli .....	37
3.7 Laskentahila .....	39
3.8 Reunaehdot .....	42
3.9 Numeeriset menetelmät .....	43
3.10 Liikkuvan junan mallinnus .....	44
3.11 Tulosten oikeellisuus .....	45
4 Validointitutkimus .....	47
4.1 Tutkimuksen kuvaus .....	47
4.2 Tulokset .....	48
5 Pissararata .....	51
5.1 Kohteen kuvaus .....	51
5.2 Pissararadan tunnelin LVI-tekniset perusratkaisut .....	52
5.3 Simulaatioiden lähtötiedot .....	53
5.4 Pissararadan simulaatiot .....	57
6 Pissararadan simulaatioiden tulokset .....	58
6.1 Laskentahila .....	58
6.2 Kaksiulotteiset simulaatiot .....	64
6.3 Kolmiulotteiset simulaatiot .....	77
7 Pohdinta .....	88
7.1 Validointitutkimus .....	88
7.2 Pissararadan junatunnelin suuaukon simulaatiot .....	88
8 Yhteenveto .....	91
Lähdeluettelo .....	93

## Merkinnät

$A$	$[m^2]$	Pinta-ala
$B$	$[-]$	Dimensioton vakio seinämälaisissa
$C$	$[1/m^2]$	Viskositeetti vakio
$C_p$	$[J/Kkg]$	Fluidin ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa
$C_\mu$	$[-]$	Empiirinen vakio $k - \epsilon$ turbulenssimallissa
$C_1$ ja $C_2$	$[-]$	Empiirisiä vakioita $k - \epsilon$ turbulenssimallissa
$CFL$	$[-]$	Courant-Friedrihs-Lewy luku
$D_H$	$[m]$	Hydraulinen halkaisija
$Gr$	$[-]$	Grashofin luku
$K$	$[1/m]$	Kertahäviölle määritelty vakio virtauksen painehäviöissä
$K$	$[J]$	Kineettinen energia $k - \epsilon$ turbulenssimallissa
$L$	$[m]$	Karakteristinen pituus
$M$	$[-]$	Machin luku
$Nu$	$[-]$	Nusseltin luku
$P$	$[m]$	Poikkileikkauksessa fluidiin kosketuksissa oleva piiri
$Pr$	$[-]$	Prandtin luku
$Ra$	$[-]$	Rayleighin luku
$Re$	$[-]$	Reynoldsin luku
$S$	$[K]$	Sutherlandin vakio ilmalle
$S_{DR}$	$[-]$	Lähdetermi painehäviöille
$T$	$[K]$	Lämpötila
$T'$	$[K]$	Lämpötilan heilahteleva arvo RANS turbulenssimallissa
$T_0$	$[K]$	Lämpötilan referenssiarvo ilmalle
$T_s$	$[K]$	Kiinteän tason lämpötila konvektiivisessa lämmönsiirtymisessä
$T_\infty$	$[K]$	Fluidin lämpötila konvektiivisessa lämmön siirtymisessä
$U$	$[m/s]$	Nopeuden keskiarvo RANS turbulenssimallissa
$U^+$	$[-]$	Dimensioton nopeus rajakerroksessa
$U_t$	$[m/s]$	Seinän nopeustangentti seinämälaisissa
$V$	$[m/s]$	Fluidin nopeus
$c$	$[m/s]$	Äänen nopeus väliaineessa
$f$	$[-]$	Pinnan kitkakerroin
$g$	$[m/s^2]$	Painovoiman aiheuttama kiihtyvyys
$h$	$[W/m^2K]$	Konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin
$i$	$[-]$	Globaali koordinaattisuunta
$k$	$[W/mK]$	Aineelle ominainen johtumisvakio
$k_t$	$[J/mK^2]$	Pyörrejohtavuus RANS turbulenssimallissa
$k_w$	$[W/sK]$	Lämmön johtuminen rajakerroksessa
$n$	$[-]$	Ainekohtainen vakio ilmalle potenssilaissa
$r$	$[m]$	Etäisyys pyörimisakselista
$t$	$[s]$	Aika
$u$	$[m/s]$	Fluidin x-komponentin suuntainen nopeus
$u'$	$[m/s]$	Nopeuden heilahteleva arvo RANS turbulenssimallissa
$q''$	$[W/m^2]$	Lämpövuoto
$q''_x$	$[W/m^2]$	x-suuntainen lämpövuoto
$q_{jäänös}$	$[W/m^2]$	Jäännösarvo
$q_v$	$[J/m^3s]$	Tilavuudellisen lämmön lähde
$v$	$[m/s]$	y-komponenttien suuntainen nopeus

$w$	$[m/s]$	$z$ -komponenttien suuntainen nopeus
$y^+$	$[-]$	Dimensioton etäisyys kiinteästä seinästä
$x_0, y_0$ ja $z_0$	$[-]$	Lokaalin koordinaattijärjestelmän globaali positio Autodesk CFD:n liike moduulissa
$\Delta T$	$[K]$	Lämpötilan muutos
$\alpha$	$[m^2/s]$	Terminen diffuusiokerroin
$\beta$	$[1/K]$	Tilavuuden laajenemisvakio
$\delta$	$[m]$	Etäisyys seinästä seinämälaisissa
$\delta_s$	$[-]$	Autodesk CFD:n käyttämä pituusluokka
$\varepsilon$	$[m]$	Pinnan karheus
$\varepsilon$	$[J/s]$	Energian häviö $k - \epsilon$ turbulenssimallissa
$\zeta_x, \zeta_y$ ja $\zeta_z$	$[-]$	Paikallisen $z$ -akselin komponentit Autodesk CFD:n liike-moduulissa
$\eta_x, \eta_y$ ja $\eta_z$	$[-]$	Paikallisen $y$ -akselin komponentit Autodesk CFD:n liike-moduulissa
$\kappa$	$[-]$	Dimensioton vakio seinämälaisissa
$\mu$	$[Pa \cdot s]$	Fluidin dynaaminen viskositeetti
$\mu_t$	$[Pa \cdot s]$	Pyörreviskositeetti RANS turbulenssimallissa
$\mu_0$	$[Pa \cdot s]$	Viskositeetin referenssiarvo ilmalle
$\nu$	$[m^2/s]$	Kinemaattinen viskositeetti
$\xi_x, \xi_y$ ja $\xi_z$	$[-]$	Paikallisen $x$ -akselin komponentit Autodesk CFD:n liike-moduulissa
$\rho$	$[kg/m^3]$	Fluidin tiheys
$\sigma_t$	$[-]$	Turbulentti Prandltin numero $k - \epsilon$ turbulenssimallissa
$\sigma_K$ ja $\sigma_\varepsilon$	$[-]$	Schmidtin numeroita $k - \epsilon$ turbulenssimallissa
$\sigma_L$	$[-]$	Laminaarinen Prandtl luku
$\tau_{xy}$	$[Pa]$	Leikkausjännitystensorin $xy$ -komponentti
$\tau_w$	$[Pa]$	Leikkausjännitys seinällä seinämälaisissa
$\omega$	$[1/s]$	Pyörimisnopeus
$\xi^0, \eta^0$ ja $\zeta^0$	$[-]$	Liikkuvan kappaleen keskipisteen paikalliset koordinaatit Autodesk CFD:n liikemoduulissa

## Lyhenteet

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
FANS	Favre Averaged Navier-Stokes
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
FVM	Finite Volume Method
infraRYL	Infrakentamisen yleiset laatuvaatimukset
IEA	International Energy Agency
UIC	International Union of Railways
LES	Large Eddy simulation
LVI	Lämpö, Vesi ja Ilma
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied
QUICK	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RATO	Ratatekniset ohjeet
RWI	Relative Warmth Index
SES	Subway Environment Simulator
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLE-C	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent
SIMPLE-R	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Revised

# 1 Johdanto

Pisaratunneli on Helsingin keskustan alle sijoittuva joukkoliikennejärjestelmä, jonka hankesuunnittelu sisältyy Helsingin seudun liikennejärjestelmäsuunnitelmaan. Rataa varten on tehty alustavia hankesuunnitelmia vuoteen 2017 asti, jolloin projekti jäi tauolle. Pisaratunneli on noin 8 kilometriä pitkä kahden vierekkäisen ja molemmista päistä avoimien ratatunnelien sekä tunnelien sisällä kolmen aseman muodostama kompleksiksi. Pasilan asema sijaitsee tunnelien ulkopuolella. Töölön, Helsingin keskustan sekä Hakaniemen asemat sijaitsevat sen sijaan ratatunnelin sisällä. Junat kulkevat Pasilasta lähtien molempiin suuntiin: toisella radalla kohti Töölöä ja toisella kohti Hakaniemeä.

Granlund Oy oli mukana projektin hankesuunnittelussa. Suunnittelun yhteydessä tunnelin lämpötila- ja paineolosuhteita ja ilmapvirtauksia mallinnettiin yksiulotteisesti IDA Tunnel ohjelmistolla. Mallinnuksessa havaittiin, että tunnelit ovat vaarassa jäätyä suuaukkojen ja ensimmäisten asemien välissä kovilla pakkaskeleillä, kun kylmää ilmaa virtaa tunneliin. Junien aiheuttama mäntäilmiö kuljettaa toisaalta myös ulkoilmaa lämpimämpää ilmaa maanalaisilta asemalaitureilta kohti tunnelien suuaukkoja. Ennen suuaukkoa kaksi ratatunnelia yhdistyvät yhdeksi lyhyeksi tuplaratatunneliksi, jonka kohdalla ilman virtauksien käyttäytymistä on hankalampi ennustaa eikä sen vaikutusta ole huomioitu yksiulotteisissa simulaatioissa, jonka vuoksi tarkempi virtaussimulaatio on tarpeellinen.

Tämän työn tavoite on selvittää ja eritellä junatunnelien LVI-suunnittelun erityispiirteet erityisesti tunnelin jäätyksen näkökulmasta ja tunnelien kolmiulotteiseen virtausmallinnukseen vaadittava teoria. Työssä mallinnetaan Pisaratunnelin tunnelin suuaukon virtausolosuhteita. Tavoitteena on tutkia kolmiulotteisen virtausmallinnuksen soveltuvuutta junatunnelin LVI-suunnittelijan työkaluksi ja millaisia haasteita junatunnelin suuaukon virtausmallinnuksessa on. Työn tutkimuskysymys on: kiertääkö lämmin ilma kahden yksittäisen tunnelin välillä tuplaratatunnelin kohdalla.

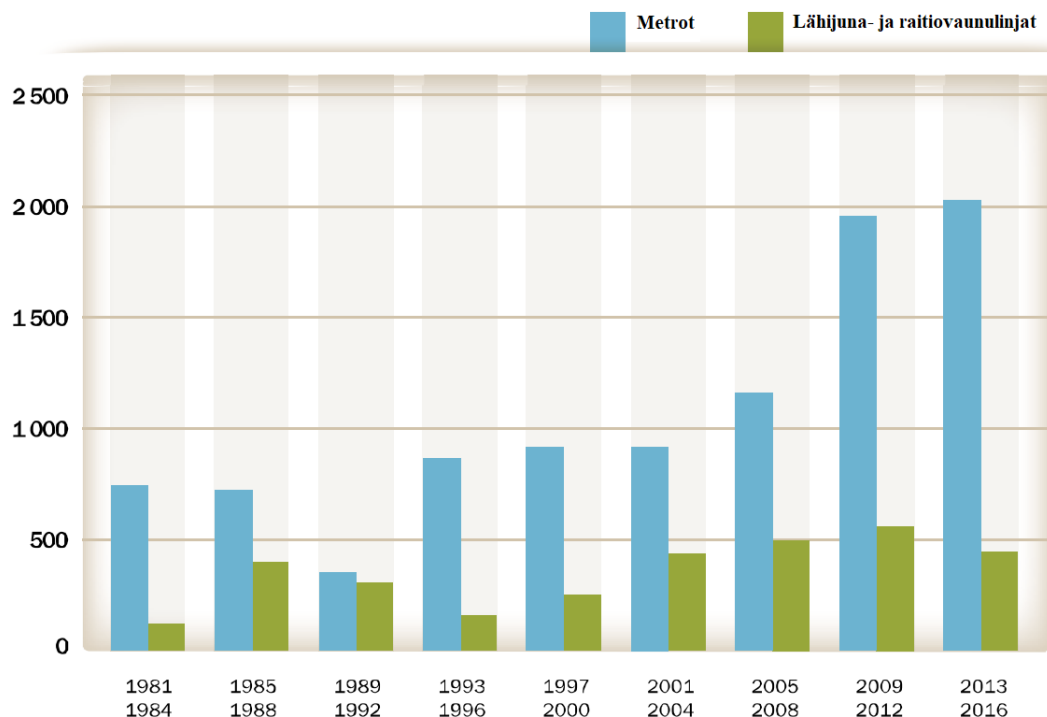
Työn rakenne on jaettu viiteen pääosioon. Ensimmäinen osio sisältää kirjallisuuskatsauksen rautatietunnelista ja keskittyy tunnelirakentamisen haasteisiin ja yleisiin toimintatapoihin taloteknisestä näkökulmasta. Osiossa käsitellään pitkiä rautatie- ja metrotunnelia, jotka sisältävät mahdollisesti maanalaisia asemalaitureita. Osiossa käsitellään tunnelien ilmanvaihtoa, savunpoistoa, lämpötilaolosuhteiden hallintaa, palonsammutusta sekä viemäröintiä. Työ ei käsittele sähkö- tai automaatiojärjestelmiä, muunlaisia tunnelia tai tunnelien yhteydessä olevia maanalaisia asemarakennuksia.

Metodiikkaosiossa esitellään yleisesti virtauslaskentaan liittyvää teoriaa ja junatunnelien virtauslaskentaan liittyvissä tutkimuksissa käytettyjä menetelmiä. Osiossa esitellään Autodesk CFD -ohjelmiston virtauslaskentaan käyttämät matemaattiset mallit ja tähän tutkimukseen olennaisesti liittyvät yhtälöt. Osiossa ei käsitellä tarkasti kaikkia junatunnelien virtauslaskentaan käytettyjä menetelmiä tai laskentamalleja. Validointiosiossa esitellään aikaisempaan tutkimukseen liittyvä kohde, joka mallinnetaan ja vertaillaan tuloksia kohteesta saatavilla oleviin kokeellisiin mittauksittain. Koekohdetta esittelevä osio sisältää kuvauksen pisaratunnelista ja sen LVI-teknisistä perusratkaisuista. Osiossa esitellään aikaisempien yksiulotteisten simulointien avulla tuotetut lähtötiedot, tässä tutkimuksessa tehtävät simuloinnit sekä tämän tutkimuksen oikeellisuutta varmistava validointitutkimus. Tuloksissa käydään läpi Pisaratunnelin simuloinneista ilmenneet asiat. Lopuksi pohdintaosiossa keskustellaan validointitutkimuksen ja pisaratunnelin simulointien tuloksista ja niiden merkityksestä Pisaratunnelin tunnelin LVI-suunnittelun näkökulmasta.

## 2 Rautatietunnelit

### 2.1 Yleisesti tunneleista

Tunnelit ovat yleensä maan alla kulkevia käytäviä, joiden läpi kuljetetaan ihmisiä tai tavaraa. Tunneleiden tarkoituksena on lyhentää ja helpottaa kuljettua reittiä ja usein myös esimerkiksi kaupunkialueilla tarkoituksena on vähentää liikenteen aiheuttamaa häiriötä lähiympäristölle. Tunnelityyppejä ovat esimerkiksi maantietunnelit, rautatietunnelit sekä metrotunnelit (Bickel, 1996). Metro- ja lähijunaverkostojen pituus on kasvanut 2010-luvusta alkaen vuosittain maailmanlaajuisesti yli 600 kilometriä. Kuvassa 1 on esitetty verkostojen kiihtyvä kasvu. Suurin verkostojen rakentaja on Kiina, joka yhdessä Japanin ja Etelä-Korean kanssa liikennöi yli puolet metro- ja paikallisjunajärjestelmiä käyttävistä ihmisistä (IEA ja UIC, 2017). Julkinen liikenne on yleisesti ympäristöystävällisempi liikuntamuoto kuin yksityisautoilu (Martins, 2015) ja erityisesti metrot- ja paikallisjunajärjestelmät kuluttavat henkilöä kohden alle kymmenyksen henkilöautojen energiankäytöstä. Myös hiilidioksidipäästöt ovat henkilöautoilua ja muita julkisen liikenteen muotoja pienemmät, jonka takia metro- ja paikallisjunat ovat ympäristöystävällisin joukkoliikennemuoto kaupungeissa. Jatkuvasti lisääntyvä kaupungistuminen ja tarve ympäristöystävällisiin ratkaisuihin tulevat todennäköisesti kasvattamaan maailmanlaajuisia kysyntää metro- ja paikallisjunaverkostoille myös tulevaisuudessa (IEA ja UIC, 2017). Lisääntynyt metro- ja paikallisjunaverkostojen lukumäärä on myös kasvattanut tunnelirakentamisen määrää. Toteutuneita tunnelihankkeita Suomessa ovat esimerkiksi Helsingin metrojärjestelmä ja Länsimetron ensimmäinen vaihe. Tämän työn kohde Pissararata on myös Helsingin sisälle suunniteltu tunnelijärjestelmän sisältävä paikallisjunaverkosto. Rakentamisen lisääntyessä myös mielenkiinto tunneleiden teknisiin järjestelmiin ja tarve niihin kohdistuviin tutkimuksiin on lisääntynyt.



Kuva 1. Metro, lähijuna- ja raitiovaunuverkostojen rakentaminen vuosina 1981 - 2016 (km) (IEA ja UIC, 2017).

Keskeisiä taloteknisiä järjestelmiä junatunneleissa ovat ilmanvaihto-, palontorjunta-, viemäröinti- sekä lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät. Lisäksi tarpeellisia ovat erilaiset sähköiset järjestelmät, kuten valaistus, liikenneopasteet, valvonta, automatiikka ja ohjausjärjestelmät. Tunneleiden käyttötarkoitus ja käytötapa vaikuttavat niissä tarvittaviin teknisiin ratkaisuihin (Bickel, 1996). Teknisiin ratkaisuihin vaikuttavat lisäksi olennaisesti ajoneuvojen kulkema nopeus, tunnelin ja ajoneuvon dimensiot, käytetäänkö tunnelia ihmisten vai tavarankuljetukseen sekä mahdollisten hätätilanteiden toimintatavat (ASHRAE, 2011). Moniin metro- ja paikallisjunajärjestelmiin kuuluvat olennaisesti myös maanalaiset asemat, jotka muistuttavat teknisiltä haasteiltaan enemmän normaaleja kiinteistöjä (ASHRAE, 2011).

Eniten tunneleiden talotekniikkaan liittyviä tutkimuksia on tehty tunneleissa sattuvista tulipalotilanteista, savunpoistosta ja savukaasujen virtauksista. Tulipalotilanteita on tutkittu kokeellisesti lukuisissa hankkeissa, kuten esimerkiksi EUREKA EU499 ja Memorial Tunnel Project. Monien käytännön kokeiden tarkoituksena on ollut selvittää savukaasujen virtausominaisuuksia, takaisinvirtausta (eng. back-layering) sekä tunneleissa palavien ajoneuvojen ja muiden materiaalien lämpöarvoja (Ingason *et al.*, 2014). Tulipalotilanteiden virtausolosuhteista on tutkittu numeerisen virtauslaskennan avulla. Esimerkiksi Amouzandeh, 2014 tutki tulipalotilanteessa lämpötilakentän kehittymistä ja arvioi tunnelin rakenteiden kestävyyttä realistisessa tulipalotilanteessa yhdistämällä kolmiulotteiset virtaus- ja palosimuloinnit yksiulotteiseen seinän lämpövuota esittävään malliin. Tutkimuksessa korostui ilman nopeuden merkitys rakenteisiin kohdistuvan lämpövuon minimoimisessa.  $3\text{ m/s}$  ilman nopeus verrattuna  $0,5\text{ m/s}$  laski seinärakenteen läpi kulkevaa lämpövuota jopa 50 %.

Normaaleissa käyttötilanteissa tunneleiden ilmavirtaukset aiheutuvat painovoimaisista ilmavirtauksista, mekaanisista ilmanvaihtolaitteista sekä tunneleissa liikkuvien ajoneuvojen aiheuttamasta mäntäilmiöstä (López González, 2014). Tunneleiden virtausilmiöitä on tutkittu pienoismallikokeilla ja erilaisilla numeerisilla malleilla. Tutkimuksen kohteena on ollut monesti tunneleissa vallitsevat paineolosuhteet ja niiden vaikutus matkustajien mukavuuteen ja turvallisuuteen. Esimerkiksi Gerhardt, 1998 tutki tuulitunnelissa pienoismallien avulla junien ja tuulten aiheuttamia paineenvaihteluita ja ilmavirtoja maanalaisilla juna-asemilla ja arvioi niiden vaikutusta asemalaiturilla läsnäoleviin ihmisiin. Tutkimuksessa selvisi, että esimerkiksi  $160\text{ km/h}$  laiturin ohi kulkeva juna voi aiheuttaa ihmisille vaarallisia paineenvaihteluita jopa kahden metrin päähän junasta, jonka takia asemalaitureilla tulee olla riittävät varoalueet radan vieressä. Yli Mach 0,3 nopeutta liikkuvat suurnopeusjunat voivat aiheuttaa jopa suurempia paineaaltoja ilman puristuessa kokoon (López González, 2014), mutta myös matalampaa nopeutta kulkevat junat aiheuttavat suuria paineenvaihteluita suljetussa tunneliympäristössä. Matkustajiin kohdistuvia paineenvaihteluita on pyritty laskemaan hyödyntämällä laituriovia ja paineentasauskuiluja. Kim, J. Y. ja Kim, 2009 tutkivat paineentasauskuilujen ja niiden lähiympäristön virtausolosuhteita käyttäen kolmiulotteista numeerista virtauslaskentaa. Tutkimuksessa havaittiin, että lähellä asemaa sijaitsevat paineentasauskuilut pienentävät junan asemalle kohdistamaa ilmavirtausta pidemmän ajan kuin kauempana sijaitsevat kuilut. Käytännössä junien tuottama ilmavirtaus kulkee suurimmaksi osaksi paineentasauskuilun läpi, kunnes junat ohittavat kuilut. Optimaalinen kuilun sijainti tutkimuksen perusteella on siis juuri ennen maanalaista asemalaituria.

Juna- ja metrotunneleiden ilmanlaatua on tutkittu mittaamalla tunneleiden ja metroasemien pienhiukkasmääriä. Aarnio, 2005 tutki pienhiukkaspitoisuuksia ja niiden lähteitä metroasemilla Suomessa ja Martins, 2015 mittasi pienhiukkasmääriä Barcelonan

metroverkostossa eri paikoissa ja olosuhteissa. Tutkimuksissa havaittiin, että tunneleissa esiintyy metallihiukkasia, jotka ovat peräisin junien pyörien ja junakiskojen välisestä hankauksesta. Suomalaisella metroasemalla pienhiukkasia oli 5 – 6 ja Barcelonan metroasemilla 1,3 – 6,7 kertaa enemmän, kuin ulkoilmassa. Hiukkaset kulkevat pitkin tunnelia ja asemalaitureille tunnelin ilmapvirtausten mukana. Tästä syystä ilman laatuun vaikuttaa merkittävästi tunnelin ilmanvaihdon voimakkuus ja junien matkustustiheys. Lisäksi laituriovet vähensivät hiukkasmääriä laitureilla jopa puolella. Suomessa tehdyissä mittauksissa huomattiin myös, että ulkopuolisesta liikenteestä kantautuu huomattava määrä hiukkasia tunneliin, mutta esimerkiksi Barcelonan asemilla ulkoa tulevien hiukkasten määrä oli vähäinen verrattuna tunnelin sisällä syntyvien hiukkasten määrään.

Tunneleiden lämpötilaolosuhteet riippuvat vahvasti ulkopuolisen ympäristön hetkittäisestä lämpötilasta, tunnelia ympäröivän kallioperän lämpötilaan vaikuttavasta pitempiaikaisista keskilämpötiloista sekä tunnelin tekniikan ja liikkuvien ajoneuvojen tuottamasta lämpökuormasta (González-Gil, 2014). Monissa tutkimuksissa on keskitytty erityisesti tunnelien jäähdytykseen, sillä varsinkin maanalaisilla asemilla jarruttavat ja kiihdyttävät junat aiheuttavat tunnelijärjestelmälle suuren jäähdytystarpeen. Kolmiosaisessa tutkimuksessa Ampofo, 2004a; 2004b; 2004c tutki Lontoon maanalaisen metroverkoston lämpötilaolosuhteita. Tutkimuksessa arvioitiin, että maanalaisen aseman lämpötilaolosuhteiden ei tarvitse täyttää samoja vaatimuksia, kuin monien tavallisten kiinteistöjen, koska niissä vietetty aika on paljon lyhempi. Lisäksi havaittiin, että 80 % tunneliverkoston lämpökuormasta syntyy metrojunien jarrutuksesta. Tutkimuksen mukaan tunneleiden jäähdytykseen on parasta hyödyntää tehokasta ilmanvaihtoa, joka kuljettaa ylimääräisen lämmön pois ja regeneratiivisia jarruja, jotka varastoivat junan liike-energiaa sähköksi jarrutuksen aikana.

Kylmemmillä ilmastovyöhykkeillä olennaiseksi nousee myös tunnelien lämmitys ja jäätymisen estäminen. Jatkuvat pakkaset laskevat tunneleiden ja kallion pintalämpötilaa ja aiheuttavat epämukavuutta tunnelin käyttäjille. Lisäksi kylmä aiheuttaa riskin tunneleiden rakenteille ja taloteknisille järjestelmille (Ma, 2018). Kylmällä ilmastovyöhykkeellä sijaitsevien tunneleiden lämpötilaolosuhteita ja ilmapirtauksia on käsitelty esimerkiksi Kiinan pohjoisille alueille ja Venäjälle sijoittuvissa tutkimuksissa. Xuefu, 2002, analysoi maantietunnelia ympäröivän kallion lämpötilaa kolmiulotteisella numeerisella mallilla. Tutkimuksen perusteella tunnelin suuaukot ja katto olivat suurimmassa jäätymisvaarassa. Lai, 2012 mittasi kokeellisesti kylmällä ilmastovyöhykkeellä sijaitsevan maantietunnelin lämpötiloja ja huomasi, että ilman lämpötila on matalampi suuaukolla, josta ajetaan sisään verrattuna suuaukkoon, josta ajetaan ulos ja on lämpimintä tunnelin keskikohdalla. Popov, 2014 mittasi lähellä maanpintaa sijaitsevan metrotunnelin ilman, sisäpinnan sekä maaperän lämpötiloja pakkasolosuhteissa Novosibirskissa ja mallinsi tunnelissa vallitsevia ilmapirtoja ja lämpötilaolosuhteita. Tutkimuksen perusteella metrotunnelin lämpötilaolosuhteisiin vaikutti ylivoimaisesti eniten junien aiheuttama kylmän ilman virtaus tunneliin, johon verrattuna esimerkiksi tunnelin ilmanvaihdon ja ympäröivän maaperän lämpötilan vaikutus lämpöolosuhteisiin olivat merkityksettömiä. Lisäksi pakkasolosuhteiden vaikutuksia on tutkinut esimerkiksi Hu, Z., 2018, jonka tutkimuksessa selvisi, että kylmällä ilmalla ruiskubetonipinnoitteen sisällä vesi voi jäätyessään laajentua ja aiheuttaa rakenteeseen halkeilua. Tutkimuksessa todettiin, että jäätymisen estämiseksi tunnelia rakenteiden eristämiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Tutkimuksissa kerättyä tietoa hyödynnetään paikallisissa ja kansainvälisissä rakentamisen ohjeissa, määräyksissä ja lainsäädännössä. Suomessa rakentamista ohjaa



maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999). Ympäristöministeriön rakennusmääräyskokoelmassa on asetuksia ja ohjeistusta yleisesti rakennusten talotekniikan suunnitteluun. Rautatietunneleiden rakentamiseen ohjeistavat Euroopan komission asetus N:o 1303/2014, jonka pohjalta on tehty myös yhtenevät Liikenneviraston Ratatekniset ohjeet osa 18 (RATO 18) (Liikennevirasto, 2018). Kansainvälisesti toimivalla yhdysvaltalaisella American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) -järjestöllä on myös ohjeistuksia tunnelin talotekniikan suunnitteluun (ASHRAE, 2011). Rakennusprojekteissa noudatetaan projektin tilaajan vaatiessa infrarakentamisen yleisiä laatuvaatimuksia InfraRYL 2006 (Rakennustietosäätiö, 2006).

## **2.2 Vesi- ja viemärijärjestelmät**

Rautatietunneleiden suurin mahdollinen hetkittäinen veden tarve syntyy onnettomuustilanteissa tulipalon sammutukseen vaadittavan veden määrästä. Vettä tarvitaan myös esimerkiksi tunnelia puhdistettaessa. Veden virtaus- ja painevaatimukset ovat kuitenkin käytännössä tulipalon sammutustarpeen mukaiset. Tarvittava vesimäärä voidaan tuottaa liittymällä kunnalliseen vesijohtoverkostoon, mutta jos tunneli sijaitsee kaukana kunnallisesta verkostosta, voidaan hyödyntää myös läheisiä vesistöjä tai pohjavettä. Palonsammutusvesi voidaan kuljettaa tunneliin myös ulkopuolelle asennettavia palokunnan syöttöliittymien kautta tai tunnelin sisällä olevasta erillisestä palovesialtaasta pumppaamalla (Bickel, 1996).

Jäte- ja hulevettä syntyy edellisten tilanteiden lisäksi sade-, sulamis- ja tulvavetenä sekä vuotovetenä tunnelin seinämien läpi ympäröivästä maaperästä ja mahdollisista ajoneuvojen vuodoista (Bickel, 1996). Maaperän läpi kulkeutuvan vuotoveden hallinta on haastavaa erityisesti kalliorakenteissa, joissa vesi valuu kallion halkeamien läpi maanalaiseen tilaan. Vuotava vesi on maaperän pohjavettä ja suuret vuodot voivat vahingoittaa maanalaisten tilojen rakenteita ja teknisiä laitteita sekä madaltaa ympäristön pohjaveden korkeutta heikentäen maanpäällisten rakennuksien perustuksia. Vuodot aiheuttavat lisäkustannuksia ja viivyttävät rakentamista, koska vettä joudutaan pumppaamaan pois. Vuotovesi voi myöhemmin myös luoda tarpeen korjaustoimenpiteille, jotka aiheuttavat lisäkustannuksia (Ritola, 2002).

Vuotojen ehkäisemiseksi ympäröivää kallioperää voidaan rakennusvaiheen alkupuolella esi-injektoida eli tiivistää. Injektoinnissa kalliorakenteesta pyritään muodostamaan tiivis täyttämällä siinä ennalta olevat raot paisuvalla massalla, jonka koostumus valitaan kallioperätutkimusten perusteella. Myös rakennusvaiheen loppupuolella ja jälkeen on mahdollista jälki-injektoida yksittäisiä vuotokohtia, mutta tämä johtaa usein vain vuodon siirtymiseen toiseen paikkaan (Ritola, 2002; Liikennevirasto, 2018). Vuotovedet voidaan myös ohjata viemäriin salaojittamalla eli käyttämällä rei'itettyjä putkia. Salaojat sijoitetaan joko kallion sisään tai ruiskubetonin ja kallion väliin ruiskubetonisalaojituksena sekä kalliotilan alapohjaan. Kallion sisään porattavat salaojareitit voivat olla parempi vaihtoehto silloin, kun on vaarana, että ruiskubetonin ja kallion väliset salaojaputket voivat jäätyä. Ruiskubetonisalaojat sijoitetaan sellaisiin kohtiin, joissa rakentamisvaiheessa havaitaan halkeamia tai ruhjeita, kallio vuotaa tai voi alkaa vuotamaan. Haasteena on kuitenkin havaita kaikki mahdolliset vuotokohdat, jonka takia ruiskubetonisalaojituksen laadunvarmistus on erityisen tärkeää. Katosta tippuvaa vuotovettä voidaan hillitä erilaisilla sisäkattoratkaisuilla, joilla ehkäistään katossa olevan kalliopinnan kautta vuotavan veden pääsy maanalaiseen sisätilaan. Sisäkattoratkaisut ovat hyödyllisiä, kun halutaan pitää maanalaisen tilan olosuhteet ja ilmankosteus tietyssä pisteessä ja esimerkiksi suojata sähkölaitteita teknisissä tiloissa (Ritola, 2002).

Pakkaskelillä vuotava vesi voi myös muodostaa jääpuikkoja tunnelin kattoon, joka aiheuttaa turvallisuusriskin tunnelin käyttäjälle (Ji, 2012). Vesi salaojista ohjataan lopuksi tilojen pohjan salaojakerroksessa sijaitsevaan lattiasalaojan runkolinjaan (Ritola, 2002).

Ratatunnelin lattiasalaojien runkolinja on usein sijoitettu radan molemmin puolin sepelistä koostuvaan salaoituskerrokseen. Linjaan asennetaan säännöllisin välein kaivoja, joihin kaikki vedet ohjataan (Liikennevirasto, 2018). Tunnelin kaltevuudesta riippuen vesien ohjaus toteutetaan joko painovoimaa hyväksi käyttäen viettoviemärintinä tai pumppujen avulla paineviemärintinä. Paineviemärijärjestelmän pumppaamot kannattaa rakentaa alimpaan tunnelikorkeuteen, jolloin vedet tunnelista voidaan tuoda pumppaamolle mahdollisuuksien mukaan viettoviemärintinä. Tunnelista riippumatta vedet ohjataan lopuksi kunnalliseen viemäriverkostoon, tunnelin ulkopuoliseen maastoon tai vesistöön (Bickel, 1996).

Tunneli varustetaan haitallisten aineiden keräysaltailla, jos tunnelissa varaudutaan viemäroimään palonsammutukseen käytettyä vettä, tunnelin pesuvesiä tai ajoneuvojen vuotoja. Betoni- tai kallioaltaiden tilavuus mitoitetaan niin, että niihin mahtuu yhden päivän salaojavedet tai palon sammutukseen tarvittava vesimäärä riippuen siitä kumpi on isompi. Keräysaltaat kannattaa sijoittaa pumppaamoiden läheisyyteen, jos tunnelissa käytetään paineviemärintiä. Keräysaltaiden haitalliset ainekset tulee pystyä havaitsemaan ja ne tulee pystyä joko erottamaan muusta vedestä tai kuljettamaan pois erikseen, jotta maastoon tai vesistöön ei kulkeudu haitallisia aineita (Liikennevirasto, 2018).

Ratatunneleiden viemärijärjestelmän tulee pystyä käsittelemään ulkopuolisten sade- ja sulamisvesien virtaus. Mitoituksessa otetaan huomioon potentiaalinen sateen voimakkuus eli sataneen veden määrä ja toistuvuus (Bickel, 1996). Sade- ja sulamisvedet viemäroidään tunnelin suuaukon läheisyydessä niin, että ne eivät kantaudu syvemmälle tunneliin. Tulvavesien kulkeutuminen tunnelin sisälle estetään suuaukon yhteyteen asennetuilla suljettavilla tulvaportteilla, jos tunneli sijaitsee tulvarajan alapuolella eli esimerkiksi läheisen vesistön alapuolella. Tulvaporttien yhteyteen asennetaan viemärointi, jotta tulvavesi saadaan johdettua pois tunnelin suuaukolta (Bickel, 1996).

Pakkasolosuhteet aiheuttavat ongelmia tunneleiden vesi- ja viemärijärjestelmille. Putket voivat jäätyessään vaurioitua ja viemärit voivat tukkeutua, jolloin järjestelmien toimivuus ja sitä myöten koko tunnelin turvallisuus heikentyy, koska palonsammutusvesien kuljetus ja poisto vaikeutuu (Zeng, 2017; Ma, 2018). Keväisin lumien sulamisvedet voivat kulkeutua tunnelin suuaukolta tunnelin sisälle ja yöllä lämpötilan laskiessa vesi voi jäätyä ja haitata tunnelin käyttöä (Ji, 2012). Salaojaviemärien tukkeutuminen estää vuotoveden kulkeutumisen pois kalliosta, jolloin se voi kulkeutua ruiskubetonikerrokseen ja aiheuttaa jäätyessään halkeamia (Ritola, 2002; Hu, Z., 2018). Infrarakentamisen yleisissä laatuvaatimuksissa ja RATO 18 ohjeissa määritellään, että viemärijärjestelmien jäätyminen on kyettävä estämään (Rakennustietosäätiö, 2006; Liikennevirasto, 2018). Ruiskubetonipinnan lämpötilaan voidaan vaikuttaa eristämällä se tarpeenmukaisella eristekerroksella, jolloin betonin ja salaojien lämpötila saadaan pidetyksi jäätymisrajan yläpuolella (Hu, Z., 2018). Tarvittaessa myös salaojaputken ja ruiskubetonipinnan väliin on mahdollista rakentaa lämpöeriste (Ji, 2012). Eristämisen lisäksi vesi- ja viemäriputkia on myös mahdollista saattolämmittää käyttämällä putken pintaan asennettavia sähkökaapeleita (Zhou, 2016). Tunnelissa sijaitsevilla vesiputkissa voidaan jäätyminen ehkäisemiseksi myös kierrättää lämmintä vettä tai asentaa vuotovesisysteemi, jossa vesi pidetään koko ajan virtaavana (Bickel, 1996).

## 2.3 Lämmitys ja jäähdytys

Tunneleiden lämpötilaolosuhteiden hallinta poikkeaa huomattavasti jo pelkästään kokonsa puolesta tavanomaisista kiinteistöistä eikä rautatietunnelin tai maanalaisten asemien olosuhteita ole tarkoituksenmukaista mitoittaa samalla tavalla, kuin esimerkiksi toimistoja (Ampofo, 2004a). Junatunneleiden ja maanalaisten asemien lämpötilaolosuhteet vaikuttavat kuitenkin tunnelin rakenteiden ja teknisten järjestelmien toimivuuteen, tunnelissa liikkuvien ajoneuvojen toimintavarmuuteen sekä tunnelissa oleskelevien ihmisten viihtyvyyteen ja turvallisuuteen. Tunnelin lämmityksen ja jäähdytyksen suunnittelussa on tärkeää tunnistaa tunnelin sisäiset lämpöhäviöt ja lämpökuormat ja huomioida ne teknisten järjestelmien mitoituksessa.

Junatunneleihin virtaa tunnelin suuaukoilta ja paineentasauskuiluista ulkoilmaa, joka vuodenajasta riippuen joko viilentää tai lämmittää tunnelia. Liikkuvat junat, korkeat erot ulkoilman ja tunnelin lämpötilojen välillä sekä mekaaniset ilmanvaihtolaitteet lisäävät ilman virtausta, jolloin myös lämmönsiirtyminen eli virtauksen aiheuttama lämpöhäviö tai lämpökuorma kasvaa (Zhou, 2016). Tarve lämmitykselle tai jäähdytykselle on siis vahvasti riippuvainen tunnelin ulkopuolisen ympäristön lämpötilasta, kuten tavanomaisissa kiinteistöissä ja tunnelin lämmitys ja jäähdytysjärjestelmien suunnittelussa on olennaista ottaa huomioon tunnelin sijainnille ominainen ilmasto (González-Gil, 2014).

Junien jarruttaessa liike-energia muuttuu lämpöenergiaksi, joka aiheuttaa suuren lämpökuorman tunnelille ja maanalaisille asemille. Myös junien kiihdyttäessä ja liikkeessä syntyy lämpökuormaa, joka riippuu moottoreiden hyötysuhteesta. Arviolta 70 - 80 % kevyen liikenteen tunneleiden ja maanalaisten asemalaitureiden lämpökuormasta syntyy kuitenkin pelkästään junien jarrutuksesta ja kiihdytyksestä (Ampofo, 2004b; Ma, 2018). Polttomoottorilla toimivat junat vaativat moottoreiden jäähdyttämistä varten riittävästi viileää ilmaa ja myös tuottavat tunnelin sisäilmaan kuumia pakokaasuja, jotka kasvattavat tunnelin lämpökuormaa huomattavasti (Bickel, 1996). Tämän lisäksi junien ilmastointilaitteet, ihmiset, valaistus ja muut tekniset laitteet lisäävät tunneleiden lämpökuormaa (ASHRAE, 2011).

Tunnelin seinämiin ja ympäröivään maaperään varastoituu lämpöä, jos ilman lämpötila tunnelissa on suurempi kuin maaperän. Lämpöä siirtyy ilmaan, jos maaperän lämpötila on suurempi (ASHRAE, 2011). Lämpötila tunnelin sisällä muuttuu hitaammin kuin sen ulkopuolella, koska tunnelin seinämät hidastavat sen sisällä tapahtuvia muutoksia (Lai, 2012). Pitkällä aikavälillä maaperän lämpötila tunnelin ympärillä tasoittuu lähelle ympäröivän ilmaston vuotuista keskilämpötilaa (Ma, 2018).

Korkeat lämpötilat voivat johtaa tunnelien ja ajoneuvojen teknisten laitteiden ylikuumenemiseen. Tunneleissa, joissa liikkuu polttomoottorikäyttöisiä ajoneuvoja, moottoreiden jäähdytystarve voi määrittää myös tunnelin jäähdytystarpeen. Ihmiset viettävät huoltotoimenpiteitä lukuun ottamatta aikansa tunnelissa erikseen ilmastoidun junan sisällä, mutta maanalaisilla asemilla ulkoilmaa useamman asteen korkeammat lämpötilat heikentävät siellä oleskelevien mukavuutta (Ampofo, 2004a; Bickel, 1996). Toisaalta myös junien ilmastoinnin toimivuuden kannalta tunnelin ilman on oltava tarpeeksi viileää (Thompson, 2006). Lisäksi tunneleiden viilentäminen pienentää myös asemien ilmastointitarvetta, koska tunneleiden lämpötilat vaikuttavat myös maanalaisten asemien lämpötiloihin (González-Gil, 2014).

Liian alhaiset lämpötilat heikentävät korkeiden lämpötilojen tavoin tunneleiden ja asemien käyttömukavuutta (Ma, 2018), voivat aiheuttaa liikennejärjestelmän toimintaa häiritseviä kelirikkoja radalla (Zhou, 2016; Xuefu, 2002) sekä heikentävät ruiskubetonirakenteiden kestävyyttä (Hu, Z., 2018; Tan, 2013). Lisäksi jäätyvät vesiputket voivat tukkia viemäreitä, aiheuttaa vuotoja sekä heikentää koko tunnelin turvallisuutta palontorjuntajärjestelmien jäätyessä (Ma, 2018; Zeng, 2017). Kylmän ilman virtausnopeuden kasvaessa suuaukolta kohti tunnelia myös jäätyneen tunneliosuuden pituus kasvaa (Zeng, 2017). Tunnelia pitkin kylmä ilma kulkeutuu asemille asti ja kasvattaa myös niiden lämmityskustannuksia (Krasnyuk, 2019). Tunneleiden ja maanalaisten asemien lämpöolosuhteiden hallintaa määrittää siis vahvasti maanalaisen kompleksin ulkopuolinen ilmasto. Lisäksi maanalaisten asemien lämpöolosuhteet ovat vahvasti kytköksissä niihin yhteydessä olevien tunneleiden olosuhteisiin. Asemien ja tunnelin välille asennettavat laituriovet voivat pienentää lämmön siirtymistä tunnelin ja aseman välillä ja parantaa normaaleissa tilanteissa matkustusturvallisuutta, mutta toisaalta ne saattavat myös heikentää tunneleiden ilmanvaihtoa ja vaikeuttaa hätätilanteissa tunneleiden evakuoimista (González-Gil, 2014; Ma, 2018).

Ma, 2018 määrittelee, että tunnelin jäätyminen pystytään estämään, jos tunnelin lämpötila saadaan pidettyä yli viidessä celsiusasteessa. Tunneleissa ja maanalaisilla asemilla oleskelevien ihmisten viihtyvyyttä voidaan arvioida tekemällä kyselytutkimuksia ja käyttämällä erilaisia indeksejä, kuten RWI- (eng. Relative Warmth Index), PPD- (eng. Predicted Percentage Dissatisfied) ja PMV- (Predicted Mean Vote) indeksit (Ampofo, 2004a; ASHRAE, 2011). Mukavuutta määrittävät indeksit ottavat usein huomioon läsnäolijoiden aktiviteetin, vaatetuksen, ilman lämpötilan, ilmankosteuden, pinnoista säteilevän lämmönsiirron sekä ilman nopeuden. Tunneleissa ja asemilla vietetty aika on suhteellisen lyhyt ja ihmiset ovat asemilla usein ulkovaatteissa, jonka takia normaaleihin kiinteistöihin verrattuna niiden lämpötila voi olla lähempänä ulkolämpötilaa sekä niiden sisäilmalle indekseillä määritetty mukavuustaso voi olla tavallista kiinteistöä alhaisempi (ASHRAE, 2011; Ampofo, 2004a). Esimerkiksi Ampofo, 2004a ehdottaa 40 – 50 % PPD-tasoa junatunnelikompleksille.

Tarpeenmukainen rakenteiden ja teknisten järjestelmien lämpöeristäminen on ensisijainen keino ehkäistä tunneleiden jäätyminen (Zhou, 2016; Hu, Z., 2018). Tunnelin suuaukolta ja paineentasauskuiluista virtaavan ilmamäärän pienentäminen vähentää lämmön karkaamista alentaen jäätymisriskiä (Ma, 2018). Junien aiheuttamat ilman virtaukset heikkenevät puhaltamalla ilmaa junien kulkusuuntaa vastaan tunnelin suuaukolla (Zeng, 2017). Paineentasauskuiluihin asennettu säätöpelti mahdollistaa kuilun läpi virtaavan ilmamäärän ohjauksen. Pellin ohjauksessa on kuitenkin huomioitava, että se ei häiritse ratajärjestelmän toimintaa junien aiheuttamien paineiskujen kasvaessa (Ma, 2018). Lämmityskaudella junien jarrutuksessa syntyy hyödyllistä lämpöä tunneleille ja maanalaisille asemille. Lämmön tehokasta hyödyntämistä varten on kuitenkin pystyttävä estämään lämmenneen ilman virtaaminen ulos paineentasauskuilujen kautta (Zhang, 2016). Esimerkiksi liikenneviraston ohjeissa kehoitetaan ehkäisemään tunnelin jäätyminen käyttämällä riittävää määrää eristeitä, sähkölämmitystä, oviverhopuhaltimia sekä ohjailemalla ilmanvaihtoa (Liikennevirasto, 2018).

Ilmanvaihdon tehostaminen esimerkiksi mekaanisilla puhaltimilla jäähdyttää tunnelia ja asemia. Ulkoilmaan avoimet paineentasauskuilut asemien läheisyydessä sallivat lämmenneen ilman poistumisen parantaen jäähdytystä (González-Gil, 2014). Jäähdytyskaudella sähköjunilla liikennöitävien tunnelikompleksien suurin jäähdytyskuorma syntyy junien jarruttaessa. Nykyisin uudet sähköjunat on usein

varustettu regeneratiivisilla jarruilla, jotka muuttavat jarrutuksessa suurimman osan liike-energiasta lämmön sijaan sähköksi, jolloin myös jäähdytystarve pienenee huomattavasti (González-Gil, 2014; Zhang, 2016).

Lämpöpumppujen avulla on mahdollista käyttää uusiutuvaa energiaa tunneleiden ja asemien lämmitykseen ja jäähdytykseen. Lämpöpumput soveltuvat hyvin tilanteisiin, joissa lämmittävä tai jäähdyttävä väliaine on lämpötilaltaan normaalisti yli 5 – 7 °C. Lämpöpumppujen avulla voidaan hyödyntää esimerkiksi tunneleita ympäröivän maaperän tasaista lämpötilaa eli maalämpöä lämmitykseen ja jäähdytykseen asentamalla maaperään lämpöä kerääviä putkia (González-Gil, 2014). Myös tunneleiden perusveden hyödyntämistä jäähdytykseen lämpöpumppujen avulla on kokeiltu esimerkiksi Lontoon metroverkostossa (Ampofo, 2011).

Välikausina yön ja päivän ulkolämpötilaolosuhteet voivat vaihdella huomattavasti. Tunneleiden seinämät hidastavat nopeita lämpötilanmuutoksia. Tunneliseinämiin asennetut lämpöä varastoivia lämpöputket lisäävät tunnelia ympäröivän maaperän lämpökapasiteettia, eli kykyä varastoida lämpöä, jolloin lämpötilanmuutoksia hidastava ilmiö voimistuu. Tutkimuksissa on ehdotettu lyhytaikaisten lämpötilaerojen tasoittamiseen myös faasimuutosmateriaaleja (eng. phase-change material), jotka varastoivat ja vapauttavat suuren määrän latenttilämpöä muuttaessaan olomuotoaan esimerkiksi nestemäisestä kiinteäksi ja toisinpäin (Thompson, 2006).

## **2.4 Ilmanvaihto**

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa määritellään ilmanvaihdon tarkoituksiksi rakennuksissa tuottaa terveellinen, turvallinen ja viihtyisä ilmanlaatu siellä läsnä oleville ihmisille poistamalla aktiivisesti tilassa syntyvät ja sinne kantautuvat epäpuhtaudet (Ympäristöministeriö, 2017). Tunneleissa, joissa liikennöi polttomoottorikäyttöisiä ajoneuvoja epäpuhtauksien poistaminen on tärkeää. Toisaalta sähköjunat eivät puolestaan tuota niin paljon epäpuhtauksia, jolloin ilmanvaihdon rooli lämpöolosuhteiden hallinnassa on tärkeämpi. Ilmanvaihto kuljettaa epäpuhtauksien lisäksi pois ylimääräistä lämpöä viilentäen tunnelia. Jäähdytyskaudella viilennystä tarvitaan paljon, mutta lämmityskaudella vahva ilmanvaihto voi lisätä tunnelin jäätymisriskiä.

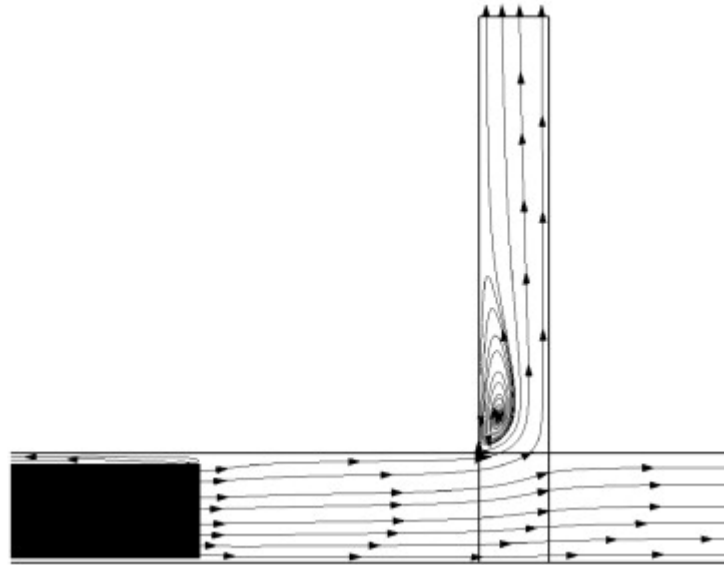
Normaalitilanteissa tunnelin ilmanvaihdon tarpeen määrittelee läsnäolijoiden viihtyisyyden ja ilman puhtauden lisäksi siis myös lämpötilaolosuhteille asetetut kriteerit (Bickel, 1996). Ruuhka-aikana tiheällä aikavälillä kulkevat junat ja lämmityskaudella kylmä ulkoilma kasvattavat ilmapirtauksia tunnelissa, mutta ilmanvaihdon on lisäksi täytettävä samat viihtyisyyden ja puhtauden kriteerit ajankohdasta huolimatta aina, kun liikennöintijärjestelmä on toiminnassa ja tunnelissa on läsnä ihmisiä (ASHRAE, 2011). Suunnittelussa huomioitavia asioita ovat ilman lämpötila, kosteus, puhtaus ja nopeus, ääniolosuhteet, junien aiheuttama nopeat painenvaihtelut ja värinä sekä junien ja tunnelien dimensiot (Bickel, 1996).

Normaalien käyttötilanteiden lisäksi tunneli ilmanvaihdon on sopeuduttava myös hätätilanteisiin. Hätätilanteissa olennaista on mahdollistaa tunnelissa olevien ihmisten evakuointi ja pelastuslaitoksen henkilökunnan työskentely ohjaamalla tulipalosta syntyvä savu ja lämpö pois evakuointi- ja pelastusreiteiltä. Savun poistoon hyödynnetään usein tunnelin normaalissa ilmanvaihdossa käytössä olevia puhaltimia, kuiluja ja kanavia, jonka takia ne mitoitetaan kestäämään korkeita lämpötiloja (Bickel, 1996; ASHRAE, 2011; Colella, 2009). Tunneliin tarvitaan ilmanvaihto myös rakennettaessa ja

huoltotoimenpiteiden aikana, jolloin normaali ilmanvaihto ei ole käytössä (ASHRAE, 2011).

Tutkimuksissa on havaittu, että tunneleiden ilmanlaatua huonontavien hiukkasten lukumäärään vaikuttaa merkittävästi ilmanvaihdon voimakkuus, junien aikataulut ja ominaisuudet sekä tunnelin kunto, koska suurin osa ilmanlaatua heikentävistä hiukkasista on junien ja junaradan välisen hankauksesta irtoavia metallihiukkasia (Kim, M., 2012; Martins, 2015). Junan jarruttaessa ja kiihdyttäessä kiskojen ja junan pyörien välinen hankaus lisääntyy ja hiukkasia syntyy enemmän. Mäntäilmiön vaikutuksesta lisääntynyt hiukkasten määrä kulkeutuu voimakkaasti kohti asemalaituria, jonka takia riski metallipartikkeleille altistumiseen on suuri junaa odotellessa, kun juna saapuu asemalle. Tunneleiden ilmanvaihtojärjestelmää säädetään usein lämpötilaolosuhteiden hallinnan mukaan. Tämän takia usein kylmänä vuodenaikana ilman laatu huonontuu, koska ilmanvaihtoa säädetään pienemmälle (Martins, 2015). Lisäksi, jos kyseessä on dieselkäyttöisillä junilla liikennöity tunneli, polttomoottorien pakokaasut sisältävät polttoaineesta riippuen erilaisia ihmisille haitallisia yhdisteitä (Bickel, 1996). Tunneleiden suuaukoilta ja paineentasauskuiluista virtaava ilma ei ole suodatettu, jonka takia kaupunkialueilla sijaitseviin tunneleihin voi kantautua epäpuhtauksia myös ympäröivästä liikenteestä (Aarnio, 2005).

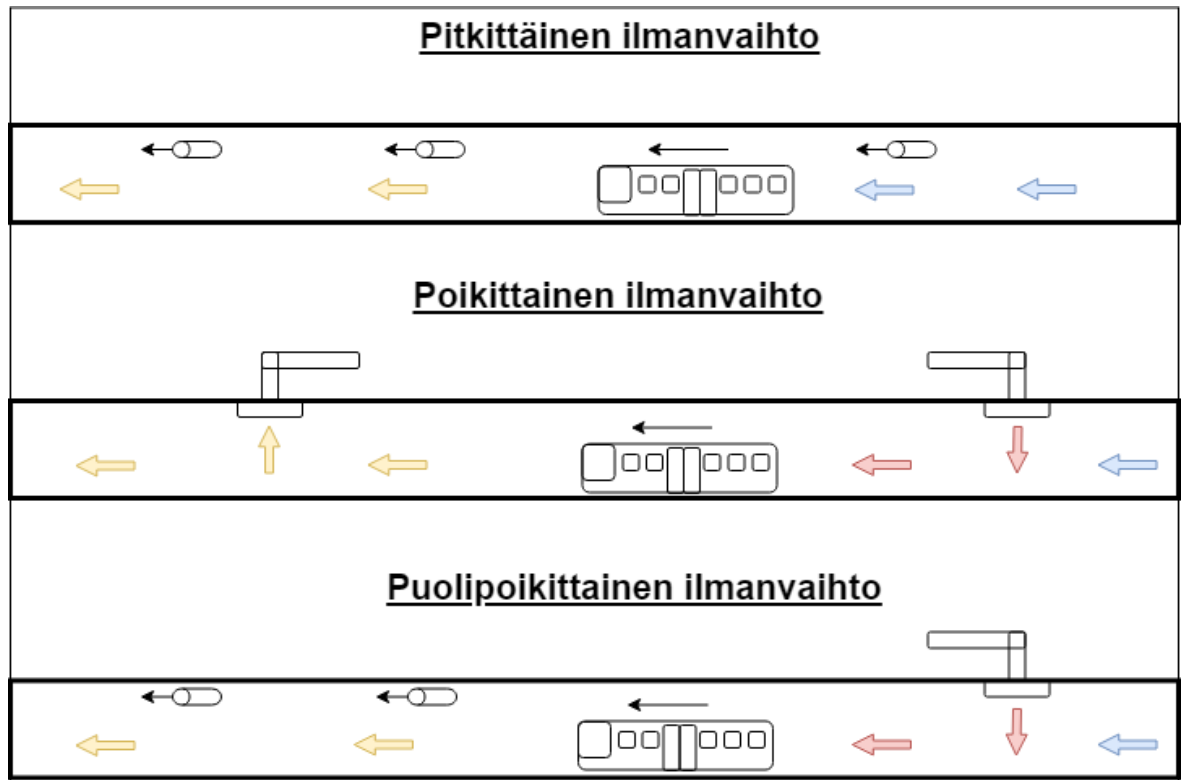
Junan liike tunnelissa aiheuttaa mäntäilmiön (eng. piston effect), joka puskee ilmaa eteenpäin, koska se ei pääse virtaamaan muuta kautta junan tieltä. Junan keulassa ilmanpaine kasvaa ja perässä paine laskee. Paine-erojen takia ilma virtaa myös junan perässä kohti kulkusuuntaa ja junaa pitkin kohti perää. Mäntäilmiön voimakkuuteen vaikuttaa junan nopeus ja poikkipinta-alan suhde tunnelin poikkipinta-alaan eli kuinka suuren osan tunnelin poikkipinta-alasta juna peittää. Vaikuttavia tekijöitä ovat lisäksi junan keulan ja perän muoto, tunnelin suuaukkojen muodot, tunnelin pituus sekä seinämien pinnankarheus (Cross, 2015; Khayrullina, 2015). Mäntäilmiö aiheuttaa maanalaisille asemalaitureille paineaaltoja, jotka voivat tuottaa epämukavuutta laiturin läsnäolijoille (Gerhardt, 1998). Esimerkiksi ilman nopeuden ollessa suuri (15 – 20 m/s) matkustajat saattavat kokea tasapainon menetyksiä, jotka voivat johtaa vaaratilanteisiin (Khayrullina, 2015). Paineiskuja voidaan pienentää käyttämällä laituriovia ja rakentamalla tunneliin kuvan 2 mukaisia paineentasauskuiluja. Paineentasauskuilut ovat tunnelista ulkoilmaan yhteydessä olevia kanavia, joiden tarkoituksena on pienentää junan aiheuttamaa paineiskuja. Paineentasauskuilut, jotka sijaitsevat mahdollisimman lähellä asemaa, vähentävät kaikista eniten junan aiheuttamaa paineiskua ja siitä aiheutuvaa haittaa matkustajille. Kuilun optimaalinen sijainti voi olla myös kauempana asemasta, jos asemalaiturilla on käytössä laituriovet ja tarkoituksena on hyödyntää mäntäilmiötä mahdollisimman paljon ilmanvaihtoon (Kim, J. Y. ja Kim, 2009).



**Kuva 2. Juna työntää ilmaa tunneliin ja ulkoilmaan rajoittuvaan paineentasauskuiluun (Kim, J. Y. ja Kim, 2009).**

Mäntäilmiön lisäksi tunneleissa vallitsee usein painovoimaisia ilmavirtauksia, jotka johtuvat tunnelin sisä- ja ulkopuolella vallitsevista lämpötiloista, tuuliolosuhteista sekä tunnelin suuaukkojen välisistä paine-eroista. Painovoimaisella ilman virtaamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa painovoiman vaikutuksesta ilma virtaa lämpötilajakauman mukaisesti niin, että lämmin ja vähemmän tiheämpi ilma pyrkii kohoamaan viileämmän ja tiheämmän ilman yläpuolelle. Maanalaisissa tunneleissa painovoimaiseen virtaukseen vaikuttaa lämpötilan lisäksi korkeusero maanpinnan ja tunnelin välillä, koska kylmä ilma pyrkii virtaamaan matalinta tasoa kohti. Painovoimainen virtaus on voimakasta varsinkin talvella, jolloin tunnelin ja ulkoilman lämpötilojen ero on suuri ja heikompaa aikoina, jolloin lämpötilat ovat lähempänä toisiaan (Mazarrón, 2015).

Aikaisemmin junien nopeudet olivat paljon pienempiä ja tunneleiden ilmanvaihto toteutettiin pelkästään mäntäilmiön ja painovoimaisten ilmavirtausten avulla. Nykyisin junat ovat nopeampia eivätkä nämä ilmiöt takaa vaihtelevan ja epäluotettavan luonteensa takia hyvää ilmanvaihtoa tunneleille. Lisäksi hätätilanteiden aikana junat eivät kulje, jolloin erillinen ilmanvaihtotapa on pakollinen turvallisen poistumisen ja pelastustyön takaamiseksi (ASHRAE, 2011; Bickel, 1996). Mekaaninen ilmanvaihto toteutetaan tunneleissa yleensä käyttämällä yhtä kuvassa 3 esitetyistä järjestelmistä eli pitkittäistä (eng. longitudinal), kokonaan poikittaista (eng. transverse) tai puolipoikittaista (eng. semi-transverse) ilmanvaihtojärjestelmää (Colella, 2009; ASHRAE, 2011). Maanalaisten asemalaitureiden ilmanvaihto on usein osa aseman ilmanvaihtojärjestelmää.



Kuva 3. Junatunnelin tyypillisten ilmanvaihtojärjestelmien periaatteet.

Pitkittäisessä ilmanvaihtojärjestelmässä ilma puhalletaan tunnelia pitkin ja tunnelin suuaukkojen tai ilmanvaihtokuilujen kautta. Pitkittäinen ilmanvaihto toteutetaan käyttämällä erillisessä ilmanvaihtokuilussa sijaitsevaa keskuspuhallinta tai säännöllisin välein tunnelin varrella usein tunnelin katossa sijaitsevia impulssipuhaltimia. Järjestelmä on kustannustehokas, koska se ei vaadi erillisiä ilmanvaihtokanavia ja sopii parhaiten tunneleille, joissa liikenne on yksisuuntaista, jolloin mäntäilmiö vahvistaa pitkittäistä ilman virtausta. Pitkittäisessä ilmanvaihtojärjestelmässä jäteilma poistuu tunnelin suuaukon, paineentasauskuilun, aseman ilmanvaihtojärjestelmän tai erillisen ilmanvaihtokuilun kautta. Ilman epäpuhtauksien pitoisuus kasvaa koko matkan, jonka se kulkee tunnelissa. Tästä syystä pitkillä tunneliosuuksilla epäpuhtauksien määrä voi kasvaa huomattavasti. Häätätilanteissa pitkittäistä ilmanvaihtojärjestelmää ohjataan niin, että tulipalossa syntyvän savun virtaus suunnataan vain yhteen suuntaan, jolloin evakuointi toiseen suuntaan on turvallista. Ongelmaksi muodostuvat tilanteet, joissa savun lähteen molemmilla puolilla on ihmisiä. Kyseisissä tilanteissa ihmisten on pystyttävä siirtymään nopeasti pois savun virtausreitiltä esimerkiksi hätäuloskäynnin tai tunnelin suuaukon kautta. Kyseisestä haasteesta huolimatta pitkittäiset ilmanvaihtojärjestelmät ovat kustannustehokkuutensa takia suosittuja varsinkin sähköjunilla liikennöidyissä tunneleissa, joissa epäpuhtauksien määrä ei määritä ilmanvaihdon mitoitusta. Pitkittäistä ilmanvaihtojärjestelmää mitoitettaessa on huomioitava puhaltimien lämpötilan kestävyys lisäksi niiden kyky tuottaa tarpeeksi nopea ilmavirtaus, jotta varmistetaan savun virtaus haluttuun suuntaan (ASHRAE, 2011; Bickel, 1996; Ingason *et al.*, 2014).

Kokonaan poikittainen ilmanvaihto muistuttaa enemmän tavanomaisen kiinteistön ilmanvaihtoa. Siinä ilma kuljetetaan ilmanvaihtokanavia pitkin tunneliin ja sieltä ulos useasta pisteestä pitkin tunnelia, jolloin epäpuhtauksien määrä ei kerry samalla tavalla, kuin pitkittäisessä ilmanvaihdossa. Tästä syystä järjestelmä sopii hyvin yli 2,1 kilometriä pitkille tunneleille, joissa syntyy paljon epäpuhtauksia (Bickel, 1996; ASHRAE, 2011).



Tulo- ja poistoilman määrät tasapainotetaan, jolloin myös tunnelin paine on tasapainossa lukuun ottamatta liikenteen aiheuttamaa mäntäilmiötä. Erittäin pitkät tunnelit vaativat useamman ilmanvaihtokoneen, jolloin tunneli jakautuu eri koneiden palvelualueisiin. Tämä on hyödyllistä hätätilanteissa, koska palvelualueiden avulla savun kulkua voidaan ohjailla säätämällä tulo- ja poistoilman suhdetta. Lisäämällä tuloilman suhteellista osuutta luodaan ylipaine, joka syrjäyttää savua ja toisaalta lisäämällä poistoa luodaan alipaine, joka imee savua toiselta palvelualueelta. Järjestelmän maksimaalinen poistoilmavirta on mitoitettava niin, että savu on mahdollista poistaa sen kautta tehokkaasti (Bickel, 1996; Ingason *et al.*, 2014; ASHRAE, 2011)

Puolipoikittaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä vain tulo- tai poistoilma tuodaan ilmanvaihtokanavaa pitkin, jolloin ilman virtaus kulkee myös tunnelin suuaukon kautta. Pelkästään tuloilmaa tuottavan järjestelmän päämääränä on pienentää epäpuhtauksien suhteellista osuutta tunnelin sisäilmassa ja varmistaa jatkuva ilman virtaus ulos tunnelista. Poistoilmapistettä käyttävän järjestelmän kokoonpano määräytyy tunnelin liikenteen kulkusuunnan mukaan. Tunnelissa, jossa liikenne on yksisuuntaista, epäpuhtauksien määrä on suurin poistumissuuaukolla, kun taas tunnelissa, jossa liikenne on molemmin suuntaista, epäpuhtauksien määrä on suurin tunnelin keskellä. Tunnelipalon sattuessa savu halutaan ohjata pois tunnelin suuaukolta. Tästä syystä tuloilmaa tuottavan puolipoikittaisen ilmanvaihtojärjestelmä on varustettava suuntaa vaihtavilla puhaltimilla ja riittävän isoilla kanavilla, jotka sallivat savun tehokkaan poistamisen tunnelista. Puolipoikittaiset ilmanvaihtojärjestelmät soveltuvat hyvin pitkille tunneleille, mutta jos tunneli on yli 2,1 kilometriä pitkä ilman nopeus tunnelin suuaukoilla voi kasvaa kohtuuttoman suureksi (ASHRAE, 2011; Bickel, 1996; Ingason *et al.*, 2014).

## 2.5 Palontorjunta

Henkilöliikennetunneleissa kulkee samanaikaisesti huomattava määrä ihmisiä, jonka takia tulipalot tunneleissa voivat olla erittäin tuhoisia, vaikka itse tunnelin rakenteet monesti sietävät korkeita lämpötiloja hyvin. Tunneleissa sattuneiden onnettomuuksien myötä on opittu eri toiminta- ja suunnittelutapoja, joilla onnettomuuksiin voidaan varautua ja vastata paremmin tulevaisuudessa (Bickel, 1996). Tietoa tulipalojen ja savukaasujen käyttäytymisestä tunneleissa on sattuneiden onnettomuuksien lisäksi kertynyt useista käytännön kokeilla ja numeerisella virtausmallinnuksella (Ingason *et al.*, 2014). Tunneleiden palontorjunta- ja evakuoitisuunnitelmissa huomioidaan tunneliin yhteydessä olevat asemat ja muut tilat. Suunnitelmien tavoitteena on kaikkien mahdollisten tilanteiden arviointi ja yhtenäisen ja toimivan pelastussuunnitelman luominen (ASHRAE, 2011).

Tunnelit eroavat normaaleista kiinteistöistä paloturvallisuuden näkökulmasta monella tapaa. Palo-osastointi eli tulipalon leviämisen hidastaminen sulkemalla se tiettyyn kiinteistön lohkon on vaikeampaa pitkissä ja kauttaaltaan avoimissa tunneleissa. Tunnelista poistuminen onnettomuustilanteessa voi olla hankalaa, jos matkustajia kuljettanut juna pysähtyy kohtaan missä ei ole suoraa kulkureittiä ulos. Tulipalon aiheuttamat painovoimaiset ilmavirrat ovat myös monta mittaluokkaa suurempia tunneleissa. Normaaleissa kiinteistöissä koneellisen ilmanvaihdon pysähdyttyä painovoimaiset ilmavirrat syntyvät palo-osastojen välillä olevien avoimien aukkojen kautta ja ulkoilmasta vuotoilmana. Tunneleissa ilman virtaustiet ovat suurempia ja painovoimaiseen ilmavirran voimakkuuteen vaikuttavat tulipalon sijainti, tunnelin kaltevuus ja poikkileikkaus onnettomuusalueella, tunnelin pituus, rakennusmateriaalit sekä säätötilanne. Myös savun virtaus poikkeaa tavanomaisista kiinteistöistä, joissa se

kerrostuu alussa nousten katon rajaan ja laskeutuu hiljalleen ikkunoita tai ovia ylemmälle tasolle. Tunneleissa savu virtaa molempiin suuntiin aluksi pitkin kattoa laajentuen koko ajan, kunnes se lopuksi saavuttaa lattian. Tavanomaisissa kiinteistöissä palo-osastojen sisällä voi olla paljon syttyviä materiaaleja ja tulipalo voi levitä nopeasti niihin kaikkiin. Tunneleissa sen sijaan syttyviä materiaaleja ovat lähinnä ajoneuvot ja suurin osa lämmöstä siirtyy tunnelin seinämiin. Lisäksi tunnelit ovat usein niin pitkiä ja materiaalit sellaisia, että harvemmin saavutetaan pistettä, jossa kaikki palo-osastossa sijaitsevat syttyvät pinnat vaikuttaisivat tulipalon voimakkuuteen. Toisaalta kuuma savukaasu voi sytyttää toisia ajoneuvoja palamaan pitkänkin matkan päästä ja ajoneuvoissa itsessään palon lieskahdus, eli äkillinen kaikkien palavien materiaalien syttyminen, on mahdollista (Ingason *et al.*, 2014; ASHRAE, 2011).

Tulipalojen yleisimpiä syitä junien sisällä ovat tekniset viat eri osissa ajoneuvoa ja tuhopoltot. Junien ulkopuolella tulipalo voi johtua viasta hydraulisissa järjestelmissä tai jarrujen aiheuttamasta ylikuumenemisesta. Junavaunujen yhteen törmääminen tai suistuminen radalta voi myös helposti johtaa tulipaloon (Ingason *et al.*, 2014). Käytännön tutkimuksilla on pystytty selvittämään eri materiaalien käyttäytymistä palotilanteissa, niiden palonkestävyyttä sekä palokuormaa eli kuinka paljon materiaalista vapautuu lämpöä sen palaessa täydellisesti. Tunneleiden merkittävin palokuorma on siellä liikennöivät ajoneuvot ja niiden sisältämät materiaalit ja aineet. Siksi ajoneuvojen tyypillä on merkittävä vaikutus siihen, kuinka pahoja vaurioita tulipalo aiheuttaa sekä itse ajoneuvoon että tunneliin. Esimerkiksi polttomootorikäyttöisten ajoneuvojen polttoaineet lisäävät palokuormaa huomattavasti. Lisäksi teräksestä valmistetut ajoneuvot kestävät palotilanteita paremmin, kuin esimerkiksi alumiinista tai muovista valmistetut (Haack, 1998; Bickel, 1996).

Tunneleissa, kuten rakennuksissa yleensä palontorjuntaa varten arvioidaan mahdollinen palokuorma, jonka perusteella suunnitellaan kantavien ja osastoivien rakenteiden palosuojaus, rakenteiden suojaverhous sekä teknisten järjestelmien paloeristys. Lisäksi arvioidaan mahdolliset riskitilanteet, luodaan toimintasuunnitelma sekä puitteet niihin vastaamiseen esimerkiksi varmistamalla evakuointi- ja sammutusreitti eri paikoista. Palontorjuntaa avustavaan tekniikkaan kuuluvia LVI-järjestelmiä ovat automaattinen ja pelastuslaitoksen henkilökunnan ohjailtavissa oleva mekaaninen savunpoisto ja palonsammutusjärjestelmä. Muita palontorjuntaan kuuluvia teknisiä järjestelmiä ovat esimerkiksi turvavalaistus ja automaattinen paloilmoitinjärjestelmä (Ingason *et al.*, 2014; Liikennevirasto, 2018).

Savunpoistossa tärkeää on varmistaa savun kulku haluttuun suuntaan, eli pois ihmisten luota. Tulesta johtuva korkea lämpötila aiheuttaa nopeaa turbulenttia virtausta, jossa ilma kohoaa ylös, jolloin savu saattaa virrata vastakkaiseen suuntaan kuin normaali ilmanvaihto. Riittävän nopea mekaaninen puhallus estää takaisinvirtauksen. Savun takaisinvirtausta estävää nopeutta kutsutaan kriittiseksi nopeudeksi. Kriittiseen nopeuteen vaikuttaa tulipalon voimakkuus, tunnelin dimensiot sekä ajoneuvojen virtausta estävä vaikutus. Kriittinen nopeus on tutkimusten perusteella mittaluokaltaan yleensä suunnilleen  $3 - 3.5 \text{ m/s}$  ja sen saavuttamiseen käytetään ilmanvaihtojärjestelmästä riippumatta usein impulssipuhaltimia. Toisaalta, liian suuri nopeuden kasvattaminen voi myös tehostaa palon leviämistä, joka on huomioitava ilmanvaihdon nopeutta säätäessä (Ingason *et al.*, 2014).

Palonsammutukseen käytetään tunneleissa yleensä sprinklerijärjestelmää, joiden tyyppi on usein joko vesisuihku- tai vesisumujärjestelmänä. Suihku- ja sumujärjestelmien eroina on vesivuon tiheys sekä veden paine ja pisarakoko. Vesisumujärjestelmässä vaadittu

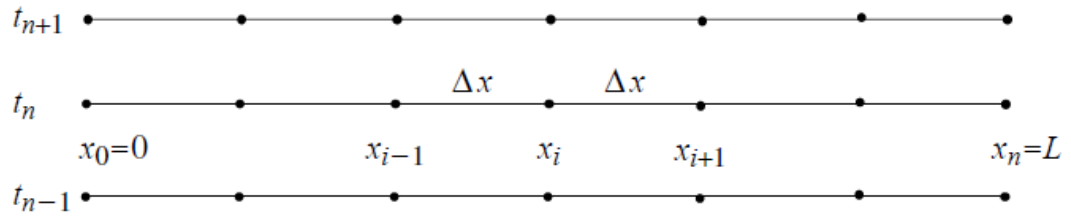
veden paine on suurempi ja pisarakoko pienempi, jolloin järjestelmän kuluttama vesimäärä on pienempi. Sprinklerijärjestelmä on joko märkä tai kuivajärjestelmä eli putkisto on jatkuvasti täytettynä, jolloin järjestelmän reagointiaika palotilanteessa on nopea tai putkisto täytetään vasta hätätilanteessa. Kuivajärjestelmän reagointiaika on pidempi, mutta etuna on, että vesi ei pääse jäätymään putkistossa pakkasella (Ingason *et al.*, 2014). Liikennevirasto ohjeistaa käyttämään tunneleissaan vesipaloposteja, jotka on toteutettu kuivajärjestelmänä. Palotilanteessa vesi kuljetetaan joko palokunnan toimesta pumpuilla syöttöliittymien kautta palovesialtaista tai kunnallisesta vesijohtoverkostosta. Lisäksi tunnelin yhteydessä olevissa teknisissä tiloissa ohjeistetaan käyttämään käsisammuttimia, jotta vältytään vahingoilta sähkölaitteiden kanssa. Lopulliset vaatimukset palontorjuntajärjestelmille määrittää kuitenkin paikallinen pelastusviranomainen (Liikennevirasto, 2018).

### 3 Numeerinen virtauslaskenta

#### 3.1 Yleisesti

Junatunneleiden ilmanvaihdon on sopeuduttava monenlaisiin tilanteisiin jatkuvasti muuttuvissa olosuhteissa, jonka takia tunnelissa vallitsevien virtausilmiöiden tutkiminen ja ymmärtäminen on tärkeää. Täysimittaiset kokeet vaativat oikeanlaisen koeympäristön, joka on yleensä käytöstä poistettu tunneli sekä myös mittavan rahallisen investoinnin. Kokeiden suorittamiseen kuluu myös huomattava määrä aikaa, joka edellä mainittujen syiden lisäksi on rajoittanut samalla kertaa tutkittavien ilmiöiden määrää silloin kun tunneleihin liittyviä kokeellisia mittauksia on suoritettu. Myös pienoismallikokeiden avulla kartutetaan arvokasta tietoa vallitsevista ilmiöistä, mutta tulosten oikeellisuus täysimittaisiin tilanteisiin verrattuna riippuu skaalatuista parametreista eivätkä tilanteet välttämättä ole suoraan verrannollisia toisiinsa. Täysimittaisten ja pienoismallikokeiden avulla on kaikesta huolimatta kerätty paljon hyödyllistä tietoa, jonka avulla on pystytty kehittämään ja varmistamaan tunneleiden ilmapvirtauksia esittäviä numeerisia laskentamalleja (Colella, 2009).

Numeerisessa virtauslaskennassa mallinnetaan fluidin käyttäytymistä eri tilanteissa. Fluideja ovat esimerkiksi kaikki nesteet ja kaasut. Kiinteisiin aineisiin verrattuna fluidin ero on se, että fluidi deformatuu eli muuttaa muotoaan esimerkiksi sen ympärillä olevan astian muotoon. Fluidit eivät siis pysty vastustamaan niiden pinnan suuntaista leikkausvoimaa vaan deformatuvat sen vaikutuksesta. Fluidien käyttäytymistä kuvaavat yhtälöt ovat differentiaaliyhtälöitä eikä niihin usein löydy helposti analyttistä vastausta, jonka takia ratkaisuun käytetään numeerisia menetelmiä. Numeerisen virtauslaskennan perusajatus on jakaa fluidin tilavuus koppeihin ja laskea fluidin ominaisuudet koppien määrittämissä solmupisteissä virtausta kuvaavien perusyhtälöiden avulla. Etäisyyttä kuvaavat differentiaalit jaetaan siis äärellisiin arvoihin, jotka riippuvat koppien koosta. Myös aikaa kuvaavat differentiaalit diskretoidaan samalla tapaa äärellisiksi jaksoiksi. Kuvassa 4 on yksiulotteinen esitys pituuden jakamisesta  $\Delta x$  kokoisiin koppeihin, jossa solmupisteet on merkitty indeksillä  $x_i$  ja aika-askeleet  $t_n$ .



Kuva 4. Yhden ulottuvuuden jakaminen koppeihin ja aika-askeleihin (Kundu ja Cohen, 2008).

Numeeristen menetelmien vahvuutena on se, että samalla kertaa on mahdollista tarkastella paljon erilaisia laskentatilanteita, erilaisia geometrioita sekä laajempaa kokonaisuutta, kuten esimerkiksi kokonaista metrotunneliverkostoa. Haasteena junatunnelien mallintamisessa on valtava laskenta-alue, monimutkaiset ilmanvaihtojärjestelmät, liikkuvat junat, olosuhteiden mukaan muuttuvat rajaehdot sekä valtava määrä erilaisia esimerkiksi eri ilmanvaihtostrategioista riippuvia laskentatilanteita. Siksi on tärkeää valita tarkoituksenmukainen ja kuhunkin tilanteeseen parhaiten soveltuva menetelmä. Numeeristen virtausmallien monimutkaisuus vaihtelee yksinkertaisimmillaan esimerkiksi yksiulotteisesta tasapainotilanteesta kolmiulotteiseen ajassa muuttuvaan malliin (Colella, 2009).

Yksi-, kaksi- ja kolmiulotteiset mallit pohjautuvat samoihin virtausta kuvaaviin perusyhtälöihin, mutta yksiulotteisissa malleissa käytetään useita oletuksia laskennan yksinkertaistamiseksi. Malleissa ilma oletetaan täysin sekoittuneeksi ja virtaus täysin kehittyneeksi kaikissa tunnelin poikkileikkauksissa. Näiden oletuksien takia mallit eivät vastaa täysin todellisuutta, vaikka laskentatuloksia voidaan parantaa esimerkiksi kokeellisista mittauksista saaduilla korjauskertoimilla (Colella, 2009). Yksinkertaistuksien takia yksiulotteisten mallien laskenta-aika on kuitenkin monesti lyhyempi kuin kaksi- tai kolmiulotteisten mallien ja sen takia niillä on käytännöllistä tarkastella esimerkiksi kokonaisen metrotunneliverkoston ilmavirtoja ja vaikkapa energian kulutusta (Ma, 2018). Kaksi- ja kolmiulotteinen virtauslaskenta vaatii enemmän prosessointikapasiteettia kuin yksiulotteinen laskenta, mutta mallinnuksen tarkkuus paranee. Tarkempi virtauslaskenta on hyödyllistä tunneleiden kohdissa, joissa täysin kehittyneen virtauksen oletus aiheuttaa suuren virheen, kuten impulssipuhaltimien, paineentasauskuilujen sekä tunnelin suuaukkojen kohdilla. Toisaalta, jos mallinetaan vain yksittäinen kohta sen rajapinnoille tarvitaan rajaehdot, jotka määräytyvät muualla tunnelissa, jolloin voi olla käytännöllistä käyttää hyväksi yksiulotteista virtauslaskentaa tarkemman laskennan rajaehtojen selvittämiseksi (Camelli, 2014; Colella, 2009).

Varhaisimpia esimerkkejä yksiulotteisesta tunnelivirtauksien laskentaohjelmistosta on 1970-luvulla Yhdysvalloissa kehitetty *Subway Environment Simulator* (SES), jonka avulla on suunniteltu metrotunnelijärjestelmiä esimerkiksi Atlantaan ja Baltimoreen (Camelli, 2014). Ruotsalainen *EQUA Simulation AB* aloitti SES:in teoriaan pohjautuvan *IDA Tunnel* -ohjelmiston kehittämisen 1995 ja kyseistä ohjelmistoa on käytetty metrotunnelien suunnittelussa esimerkiksi Tukholmassa, Lontoossa, Helsingissä sekä Pekingissä (Ma, 2018). Kaksi- ja kolmiulotteiseen virtauslaskentaan on olemassa monia kaupallisia ohjelmistoja, kuten *ANSYS CFX*, *ANSYS Fluent*, *PHOENICS*, *STAR CCM+* (Ingason *et al.*, 2014) ja tässä työssä käytetty *Autodesk CFD 2019*. Monet kaupalliset ohjelmat ja niiden sisältämät menetelmät soveltuvat tunnelien virtauksien mallintamiseen, mutta usein on kannattavaa verrata uudella menetelmällä saatuja tuloksia esimerkiksi aiemmin laskettuihin tai kokeellisesti saatuihin tuloksiin, jotta varmistetaan menetelmien toimivuus (Cross, 2015; Khayrullina, 2015).

Yksiulotteisella numeerisella virtauslaskennalla on tutkittu esimerkiksi ankaralla pakkasalueella sijaitsevan metroaseman lämpötilaolosuhteiden parantamista simuloimalla eri ilmanvaihdon kontrollistrategioita (Ma, 2018), laituriovien vaikutusta laiturin ilmastoinnin energiatehokkuuteen (Hu, S., 2004) sekä kartoitettu Lontoon metrotunneliverkostossa yhden linjan lämpöhäviöitä ja lämpökuormia (Mortada, 2015).

Kaksi- ja kolmiulotteisella numeerisella virtauslaskennalla on tutkittu esimerkiksi junien aiheuttamaa epävakaa virtausta (Kim, J. Y. ja Kim, 2007), paineentasauskuilujen vaikutusta tunnelin ilmanvaihdon suorituskykyyn (Kim, J. Y. ja Kim, 2009), yksiulotteisen ja kolmiulotteisen mallin yhdistämistä junatunnelin ilmanvaihdon mallintamisessa (Colella, 2009), junatunnelin ja maanalaisen aseman välisen ilmaverhon vaikutusta aseman ilmanlaatuun (Juraeva, 2011), konvektiivista lämmönsiirtymistä ankaralla pakkasalueella sijaitsevassa tunnelissa (Tan, 2013), metrotunneliverkoston ilmanvaihdon mallintamista kolmiulotteisella virtauslaskennalla (Camelli, 2014), mäntäilmiön vaikutusta tunnelin pitkittäiseen ilmanvaihtoon (López González, 2014), Junien ja tunnelin poikkileikkauksen pinta-alan suhteen vaikutusta junan aiheuttamaan mäntäilmiöön ja junan ilmanvastukseen (Cross, 2015), Junien mäntäilmiön hyödyntämistä maanalaisen aseman ilmanvaihdossa laiturioviin asennettavien säädeltävien aukkojen avulla (Yang, 2015), henkilö- ja tavaraliikennejunien aiheuttaman ilmapirtauksen voimakkuutta maanalaisella asemalaiturilla (Khayrullina, 2015) sekä esimerkiksi junan jarrutuksessa syntyvän lämmön siirtymistä maanalaiselle asemalle (Zhang, 2016).

Numeeristen menetelmien oikeellisuutta on varmistettu tutkimuksissa esimerkiksi vertaamalla pienoismallista saatuja mittauksia (Kim, J. Y. ja Kim, 2007; Khayrullina, 2015; Cross, 2015) ja oikeasta tunnelista mitattuja tuloksia (Zhang, 2016) kolmiulotteisesta virtauslaskennasta saatuihin tuloksiin. Mainituissa tutkimuksissa käytetään paljon samoja hyväksi todettuja menetelmiä, jotka esitellään seuraavissa luvuissa. Mallinnukseen käytettävät yhtälöt on esitetty siinä muodossa kuin ne on annettu Autodesk CFD 2019 -ohjelmiston ohjeissa (Autodesk, 2018).

### 3.2 Virtauksen perusominaisuudet

Tavallisesti fysiikassa aineet jaetaan kiinteisiin, nestemäisiin ja kaasumaisiin aineisiin. Virtausmekaniikassa jako fluideihin ja kiinteisiin aineisiin on sen sijaan käytännöllisempi. Edellä määriteltiin, että fluidit eivät pysty vastustamaan niihin kohdistettua leikkausjännitystä deformatumatta. Fluideihin kohdistuvan leikkausjännityksen vaikutuksen osoittaa aineominaisuus nimeltä *viskositeetti*, joka kuvaa leikkausjännityksen aikaansaamaa kuormitusta fluidikerrosten välillä yhtälön 1 mukaisesti. *Newtonilaisiksi fluideiksi* kutsutaan niitä aineita, joiden viskositeetti ei vaikuta leikkausjännityksen suuruus, vaan pelkästään lämpötilan ja paineen vaihtelut (White, 2005). Junatunneleissa tarkasteltava fluidi on ilma, joka luokitellaan newtonilaiseksi fluidiksi.

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

missä  $\tau_{xy}$  on leikkausjännitystensorin xy-komponentti [Pa]  
 $\mu$  on fluidin dynaaminen viskositeetti [Pa s]  
 $u$  on fluidin x-komponentin suuntainen nopeus [m/s]

Viskositeetin kuvaamiseen käytetään usein myös kinemaattista viskositeettia, joka määritellään yhtälön 2 mukaisesti (White, 2005).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

missä  $\nu$  on kinemaattinen viskositeetti [ $m^2/s$ ]  
 $\rho$  on fluidin tiheys [ $kg/m^3$ ]

Ilman viskositeetti kasvaa lämpötilan tai paineen kasvaessa. Viskositeetti ei kuitenkaan käyttäydy lineaarisesti näiden muuttujien suhteen. Toisaalta matalien paineenvaihteluiden vaikutus ilman viskositeettiin ei ole suuri, jonka takia se määritellään monesti vakiopaineessa tietyille lämpötiloille joko laskennallisesti approksimoitujen tai kokeellisesti määritettyjen taulukoitujen arvojen perusteella (White, 2005). Junatunneleiden mallinnuksessa viskositeetti oletetaan vakioksi, jos tunnelin sisällä lämpötila ei vaihtelee (Cross, 2015). Viskositeetti approksimoidaan esimerkiksi potenssilain tai Sutherlandin lain mukaan tai käytetään taulukoituja arvoja, jos lämpötila vaihtelee merkittävästi. Potenssilaki on esitetty yhtälössä 3 ja Sutherlandin laki yhtälössä 4 ilmalle ominaisten referenssiarvojen kanssa (White, 2005). Taulukossa 1 on esitetty molemmilla menetelmillä laskettuja ilman viskositeetin arvoja. Approksimoinnissa syntyvä virhe on potenssilailailla  $\pm 4 \%$  kun lämpötilat ovat  $210 - 1900 \text{ K}$  ja Sutherlandin lailla  $\pm 2 \%$  lämpötiloilla  $170 - 1900 \text{ K}$ .

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \quad (3)$$

missä  $\mu_0 = 1.716 * 10^{-5}$  on viskositeetin referenssiarvo ilmalle [ $Pa \cdot s$ ]  
 $T$  on fluidin lämpötila [ $K$ ]  
 $T_0 = 273$  on lämpötilan referenssiarvo ilmalle [ $K$ ]  
 $n = 0.666$  on ainekohtainen vakio ilmalle  $[-]$

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (4)$$

missä  $S = 111$  on Sutherlandin vakio ilmalle [ $K$ ]

**Taulukko 1. Ilman viskositeetti laskettu Sutherlandin lailla ja potenssilaila tyypillisissä ulkoilman lämpötiloissa.**

Lämpötila		Sutherlandin laki	Potenssilaki
T(K)	T (°C)	$\mu$ [Pa s] $\cdot 10^{-5}$	
243,15	-30	1,5640	1,5886
248,15	-25	1,5900	1,6103
253,15	-20	1,6158	1,6319
258,15	-15	1,6414	1,6533
263,15	-10	1,6667	1,6745
268,15	-5	1,6918	1,6956
273,15	0	1,7167	1,7166
278,15	5	1,7414	1,7375
283,15	10	1,7659	1,7582
288,15	15	1,7902	1,7788
293,15	20	1,8142	1,7993
298,15	25	1,8381	1,8197
303,15	30	1,8618	1,8400

Virtaus itsessään jaetaan laminaariseen ja turbulenttiin alueeseen. Laminaarisessa virtauksessa viskositeetin aiheuttamat fluidin sisäiset voimat ovat merkittävin fluidin liikettä määrittävä tekijä. Sisäisten voimien vaikutus virtaukseen pienenee, kun fluidin nopeus kasvaa, kunnes virtaus muuttuu turbulentiksi. Virtauksen tyyppi määritellään yhtälössä 5 esitetyn dimensiotoman Reynoldsin luvun avulla. Luku kuvaa fluidin inertian ja viskoosien voimien suhdetta ja sen avulla voidaan määrittää kumpi vaikuttaa enemmän virtauksen ominaisuuksiin (Kundu ja Cohen, 2008).

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (5)$$

missä  $Re$  on Reynoldsin luku [–]  
 $V$  on fluidin nopeus [m/s]  
 $L$  on karakteristinen pituus [m]

Yhtälössä esiintyvä karakteristinen pituus  $L$  määräytyy tarkasteltavan tapauksen perusteella. Esimerkiksi sylinterin muotoisen geometrian sisällä virtaavalle fluidille karakteristinen pituus on sylinterin halkaisija (Kundu ja Cohen, 2008). Junatunnelissa karakteristinen pituus voi olla esimerkiksi tunnelin korkeus (Cross, 2015) tai muu poikkileikkauksen dimensio. Matalan Reynoldsin luvun virtaus on laminaarista ja korkean Reynoldsin luvun virtaus turbulenttista. Siirtyminen laminaarista virtauksesta turbulenttiin virtaukseen tapahtuu, kun Reynoldsin luku on noin 3000 (Kundu ja Cohen, 2008). Autodesk CFD 2019 määrittelee virtauksen turbulentiksi, kun Reynoldsin luku on 2500 (Autodesk, 2018). Junatunnelin sisällä virtaus on turbulenttista (Cross, 2015).

Fluidin tiheys vaikuttaa virtaukseen erityisesti silloin, kun se muuttuu laskennan aikana. Samoin kuin viskositeettiin, fluidin tiheyteen vaikuttaa lämpötila ja paine. Useimmissa tapauksissa fluidin tiheys pienentyy lämpötilan kasvaessa ja pienentyy lämpötilan laskiessa sekä kasvaa aina paineen kasvaessa ja pienentyy paineen pienentyessä. Lämpötilan aiheuttamat tiheyden muutokset synnyttävät painovoimaista virtausta, jonka voimakkuudesta kertoo Grashofin luku, joka on esitetty yhtälössä 6. Vertaamalla Grashofin lukua Reynoldsin luvun neliöön saadaan selville vaikuttavatko fluidin

liikkeeseen enemmän pakotettu vai painovoimainen konvektio. Jos Grashofin luku on paljon pienempi kuin Reynoldsin luvun neliö, pakotettu konvektio on merkittävämpää. Toisaalta, jos Grashofin luku on paljon suurempi, painovoimainen konvektio on hallitsevampi tekijä. Molemmat vaikuttavat virtaukseen merkittävästi, jos luvut ovat lähellä toisiaan (White, 2005).

$$Gr = \frac{\beta g L^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (6)$$

missä Gr on Grashofin luku [–]  
 $\beta$  on tilavuuden laajenemiskertoin [ $1/K$ ]  
 $g$  on painovoiman aiheuttama kiihtyvyys [ $m/s^2$ ]

Virtauslaskennassa valitaan fluidi joko kokoonpuristuvaksi tai kokoonpuristumattomaksi eli päätetään vaikuttaako paineen vaihtelut laskennan aikana fluidin tiheyteen. Paineen aiheuttamat tiheyden muutokset vaikuttavat merkittävästi virtausta kuvaaviin perusyhtälöihin, koska kokoonpuristuvassa tilanteessa tiheyskin on muuttuja (White, 2005). Kokoonpuristuvuutta voi arvioida esimerkiksi yhtälössä 7 esitetyn Machin luvun avulla. Fluidi voidaan olettaa hyvällä tarkkuudella kokoonpuristumattomaksi, jos Machin luku on pienempi kuin 0,3. Paikallisjunatunneleissa Machin luku on riittävän matala, jolloin oletus kokoonpuristumattomuudesta tuottaa tarkkoja tuloksia (Cross, 2015; Yang, 2015; Kim, J. Y. ja Kim, 2007; Kundu ja Cohen, 2008).

$$M = \frac{u}{c} \quad (7)$$

missä  $M$  on Machin luku [–]  
 $u$  on fluidin virtausnopeus [ $m/s$ ]  
 $c$  on äänen nopeus väliaineessa [ $m/s$ ]

Fluidin virratessa osa liike-energiasta häviää viskoosien voimien lisäksi myös esimerkiksi fluidin hankautuessa kiinteän aineen pintaan kitkan vaikutuksesta, virtausalueen geometriamuutosten vaikutuksesta sekä fluidin virratessa huokoisen aineen lävitse. Yhtälössä 8 on esitetty kitkahäviön suuruuteen vaikuttavat tekijät (Autodesk, 2018).

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{f}{D_H} \frac{\rho V_t^2}{2} \quad (8)$$

missä  $f$  on pinnan kitkakerroin [–]  
 $D_H$  on hydraulinen halkaisija [ $m$ ]

Yhtälössä esiintyvä hydraulinen halkaisija määräytyy virtausalueen poikkileikkauksen mukaisesti yhtälön 9 mukaisesti (White, 2005).

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (9)$$

missä  $A$  on poikkileikkauksen pinta-ala [ $m^2$ ]  
 $P$  on poikkileikkauksessa fluidiin kosketuksissa oleva piiri [ $m$ ]

Kiinteän pinnan kitkakerroin määritellään ohjelmassa yhtälössä 10 esitetyllä Moodyn suhteella (Autodesk, 2018).



$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D_H} + \frac{2.51}{Re_{D_H}\sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

missä  $\varepsilon$  on pinnan karheus [m]

Virtausalueella kiinteän aineen geometrian muutokset aiheuttavat kertahäviöitä yhtälön 11 mukaisesti. Yhtälössä esiintyvälle termille  $K$  löytyy paljon kokeellisesti määritettyjä arvoja kirjallisuudesta (Autodesk, 2018).

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = K_i \frac{\rho V_i^2}{2} \quad (11)$$

missä  $i$  on globaali koordinaattisuunta [-]  
 $K$  on kertahäviölle määritelty vakio [1/m]

Huokoisen aineen läpi virtaavan fluidin painehäviö on määritelty ohjelmassa Darcyn yhtälöllä 12 (Autodesk, 2018).

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = C\mu V_i \quad (12)$$

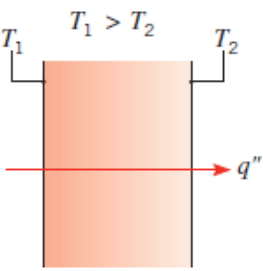
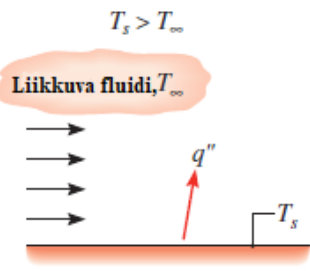
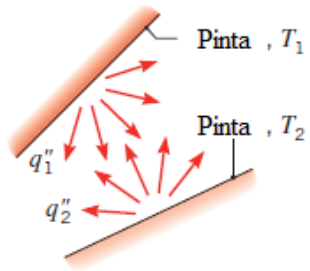
missä  $C$  on viskositeetti vakio [1/m<sup>2</sup>]

Ohjelma arvioi koko virtausalueen painehäviöt ja liittää ne osaksi virtausta määrittäviä momenttiyhtälöitä yhtälössä 13 esitetyn painehäviön lähdetermin avulla.

$$S_{DR} = - \left( K_i + \frac{f}{D_H} \right) \frac{\rho V_i^2}{2} - C\mu V_i \quad (13)$$

missä  $S_{DR}$  on lähdetermi painehäviöille [-]

Lämpöä siirtyy, kun kahden alueen lämpötilojen välillä vallitsee ero. Lämpö voi siirtyä joko aineen sisällä tai aineiden välillä kolmella tavalla; johtumalla, konvektiona sekä säteilyä. Säteilyssä lämpö siirtyy kahden aineen välillä elektromagneettisen aaltoliikkeen avulla (Incropera, 2007). Junatunneleissa säteilyn suuruus on kuitenkin suhteellisen pieni verrattuna konvektioon ja johtumiseen, koska tunnelin seinäpintojen väliset lämpötilaerot ovat vain korkeintaan muutaman asteen, jonka takia se voidaan jättää mallinnuksessa huomiotta (Zhou, 2016; Zeng, 2017). Kaikki kolme lämmönsiirron tapaa on esitetty kuvassa 5, jossa lämmönsiirto on merkitty lämpövuon  $q''$  avulla. Johtumisessa lämpö siirtyy paikallaan olevassa kiinteässä aineessa tai fluidissa molekyylien liikkeen avulla. Yksiulotteista johtumista suuremmasta lämpötilasta pienempään kuvaa yhtälössä 14 esitetty Fourierin laki (Incropera, 2007).

Johtuminen kiinteän aineen tai paikallaan olevan fluidin läpi	Konvektio kiinteältä pinnalta liikkuvaan fluidiin	Kahden pinnan välinen säteilylämmönsiirto
		

Kuva 5. Lämmön siirtyminen, suomennettu (Incropera, 2007).

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

missä  $q_x''$  on x-suuntainen lämpövuoto [ $W/m^2$ ]  
 $k$  on aineelle ominainen johtumisvakio [ $W/mK$ ]

Konvektiossa lämpö siirtyy fluidin liikkeen kautta joko mikroskooppisessa mittakaavassa fluidin molekyylien satunnaisen liikkeen eli diffuusion avulla tai makroskooppisessa mittakaavassa koko fluidin liikkeen avulla. Puhuttaessa pelkästään fluidin liikkeestä syntyvästä konvektiosta käytetään myös termiä *advektio*. Konvektiivisen lämmönsiirron synnyttämää lämpövuota kuvataan yhtälöllä 15 (Incropera, 2007).

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (15)$$

missä  $q''$  on lämpövuoto [ $W/m^2$ ]  
 $h$  on konvektiivinen lämmönsiirtymiskerroin [ $W/m^2K$ ]  
 $T_s$  on kiinteän tason lämpötila [ $K$ ]  
 $T_\infty$  on fluidin lämpötila [ $K$ ]

Lämmönsiirtymiskerrointa  $h$  käytetään kiinteän aineen ja fluidin välisen lämmönsiirtymisen kuvaamisessa (Incropera, 2007). Autodesk CFD 2019 laskee lämmönsiirtymiskertoimen kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on määrittellä lämmönsiirtymän jäännösarvo, jonka ohjelma määrittelee energiayhtälön avulla sijoittamalla viimeisimmän lämpötila- tai entalpia-arvon yhtälöön. Jäännösarvo on se arvo, joka vaaditaan tasapainotilan säilyttämiseksi. Lämmönsiirtymiskerroin määritellään tällöin yhtälöllä 16 (Autodesk, 2018).

$$h = \frac{q_{jäännös}}{\Delta T} \quad (16)$$

missä  $q_{jäännös}$  on jäännösarvo [ $W/m^2$ ]  
 $\Delta T$  on lämpötilaero seinämällä ja lähellä seinämää [ $K$ ]

Toinen ohjelman käyttämä tapa laskea lämmönsiirtymiskerroin on Nusseltin luvun avulla yhtälöllä 17. Yhtälössä esiintyvä karakteristinen mitta on esimerkiksi Reynoldsin luvusta poiketen monesti virtauksen suuntainen mitta. Nusseltin luku on konvektiivisen ja johtumisen kautta tapahtuvan lämmönsiirtymisen suhde. Autodesk CFD 2019 laskee

Nusseltin luvun dimensiottomien Reynoldsin ja Prandtin lukujen sekä empiiristen vakioiden avulla yhtälön 18 mukaisesti (Autodesk, 2018).

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (17)$$

missä  $Nu$  on Nusseltin luku [–]

$$Nu = CRe^a Pr^b \quad (18)$$

missä  $a$  on vakio [–]  
 $b$  on vakio [–]  
 $C$  on vakio [–]  
 $Pr$  on Prandtin luku [–]

Dimensioton Prandtin luku lasketaan yhtälöllä 19 ja se on fluidin viskositeetin ja termisen diffuusiokertoimen suhde. Prandtin luku kertoo vaikuttaako diffuusio fluidissa enemmän liike- vai lämpöenergian siirtymiseen. Luvun ollessa lähellä arvoa yksi molemmat ovat yhtä merkityksellisiä (Incropera, 2007).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (19)$$

missä  $\alpha$  on termien diffuusiokerroin [ $m^2/s$ ]

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (20)$$

Johtumisen ja konvektion suhdetta kuvaa myös yhtälössä 21 esitetty Rayleighin luku, joka on fluidin nosteen ja viskoosien voimien suhde. Kriittisen Rayleighin luvun arvon alapuolella lämpö siirtyy fluidissa pelkästään johtumisen avulla. Luvun noustessa kriittisen arvon yläpuolelle nosteen vaikutus kasvaa ja fluidi alkaa virtaamaan laminaarisesti. Arvon kasvaessa entisestään virtaus muuttuu lopulta turbulentiksi (Kundu ja Cohen, 2008).

$$Ra = GrPr \quad (21)$$

missä  $Ra$  on Rayleighin luku [–]

### 3.3 Hallitsevat yhtälöt

Virtauslaskennan hallitsevat yhtälöt ovat massan säilymistä kuvaava jatkuvuusyhtälö, liikemäärän säilymistä kuvaavat Navier-Stokes -yhtälöt sekä energian säilymistä kuvaava energiayhtälö. Käytännössä virtausongelmien ratkaisemiseksi ratkotaan näitä hallitsevia osittaisderivaattayhtälöitä, joiden muoto vaihtelee virtaukseen tehtävien oletusten ja käytetyn koordinaattijärjestelmän mukaisesti. Esimerkiksi kokoon puristumattomalle fluidille yhtälöt ovat yksinkertaisempia kuin kokoonpuristuvalla, koska tiheys voidaan olettaa vakioksi, jolloin ratkaistavia termejä on vähemmän (White, 2005). Seuraavat yhtälöt on esitetty karteesisessa koordinaatistomuodossa.

Jatkuvuusyhtälö 22 kuvaa fluidialueen kokonaismassan säilymistä ja kokoon puristumattomalle fluidille yhtälö yksinkertaistuu vielä yhtälössä 23 esitettyyn muotoon (White, 2005).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (22)$$

missä  $t$  on aika [s]  
 $u, v$  ja  $w$  ovat  $x$ -,  $y$ -, ja  $z$ -komponenttien suuntaiset nopeudet [m/s]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (23)$$

Newtonin toisesta laista johdetut liikemäärän säilymistä kuvaavat Navier-Stokes -yhtälöt kokoon puristumattomalle fluidille on esitetty koordinaattisuuntien mukaisesti kolmessa yhtälössä 24, 25 ja 26 (Autodesk, 2018). Yhtälöiden vasemmalla puolella ensimmäinen termi kuvaa nopeuden muutosta tietyssä paikassa ajan suhteen. Loput termit vasemmalla puolella kuvaavat nopeuden konvektiivista siirtymistä muualta tarkasteltavaan paikkaan nopeuskentän vaikutuksesta. Oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa hydrostaattista painetta ja toinen termi painegradienttia. Fluidin viskositeetin sisältävät termit kuvaavat liikemäärän jakautumista diffuusion vaikutuksesta. Viimeiset termit ovat lähdetermejä painehäviöille.

X-suuntaisen liikemäärän yhtälö.

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (24)$$

Y-suuntaisen liikemäärän yhtälö.

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} \\ &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (25)$$

Z-suuntaisen liikemäärän yhtälö.

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} \\ &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + S_\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (26)$$

missä  $S_\omega$  on lähdetermi pyörivän virtauksen aiheuttamalle painehäviölle [Pa]

$$S_\omega = -2\rho\omega_i \times V_i - \rho\omega_i \times \omega_i \times r_i \quad (27)$$

missä  $\omega$  on pyörimisnopeus [1/s]  
 $r$  on etäisyys pyörimisakselista [m]

Ensimmäisestä termodynamiikan laista kokoon puristumattomalle fluidille johdettu energian säilymistä kuvaava energiayhtälö on esitetty yhtälössä 28 (Autodesk, 2018). Samalla tavoin kuin liikemäärän säilymistä kuvaavissa Navier-stokes yhtälöissä nopeuden kanssa energiayhtälön vasen puoli kuvaa lämmön kerääntymistä tarkasteltavaan paikkaan ja konvektiivista kulkeutumista muualta. Yhtälön oikealla

puolella on Fourierin laista johdetut lämmön johtumista kuvaavat termit ja lopuksi erillistä lämmönlähdettä kuvaava termi.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v \quad (28)$$

missä  $C_p$  on fluidin ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [ $J/Kkg$ ]  
 $q_v$  on tilavuudellinen lämmön lähde [ $J/m^3s$ ]

Virtausta kuvaavat hallitsevat yhtälöt ovat monesti yksinkertaistavista oletuksista huolimatta hankalia ratkaista, koska niiden sisältämät termit muuttuvat jatkuvasti ajassa, jonka takia ratkaisuihin käytetään melkein poikkeuksetta numeerisia menetelmiä. Monissa käytännön sovelluksissa virtaukset ovat kaiken lisäksi turbulenteja, jolloin niiden käyttäytyminen muuttuu kaoottisemmaksi ja ratkaisut muuttuvat erittäin raskaiksi myös numeerisille menetelmille. Tästä syystä turbulenssien virtauksien ratkaisemiseksi käytetään hallitsevien yhtälöiden lisäksi erillisiä turbulenssimalleja, jotka pienentävät laskentakapasiteetin tarvetta. Turbulenssia kuvaavien malleihin perehdytään seuraavassa luvussa.

### 3.4 Turbulenssi

Turbulentit virtaukset ovat luonteeltaan erittäin kaoottisia ja epävakaita ja niissä esiintyy paljon pyörteilyä. Pyörteily itsessään ei kuitenkaan tarkoita sitä, että virtaus on turbulentsista, koska esimerkiksi Von Karmanin pyörteitä esiintyy myös laminaarilla virtausalueella. Turbulenssien pyörteiden ominaisuus on, että ne luovuttavat liike-energiaansa pienemmän ja pienemmän mittaluokan pyörteille, kunnes ne lopulta hajoavat viskoosien voimien vaikutuksesta (Kundu ja Cohen, 2008). Numeerisessa virtauslaskennassa turbulentin virtauksen laskemiseen on kolme päämuotoa: keskiarvotetut Navier-Stokes mallit eli FANS- (Favre Averaged Navier-Stokes) ja RANS- (Reynolds Averaged Navier-Stokes) mallit, suurten pyörteiden simulaatiomalli eli LES- (Large Eddy Simulation) simulaatiot sekä suorat numeeriset simulaatiot eli DNS- (Direct Numerical Simulation) simulaatiot (Ingason *et al.*, 2014).

DNS on edellä mainitusta kolmesta tyypistä tarkin. Siinä pyörteet simuloidaan käyttämällä samoja hallitsevia yhtälöitä kaikkialla virtausalueella. Laskentaa kuormittaa se, että tarkan tuloksen saamiseksi laskentaverkon koppien on oltava pienempiä kuin pienin virtausalueella esiintyvä pyörre. Reynoldsin luvun kasvaessa ero suurimpien ja pienimpien pyörteiden koon välillä kasvaa eksponentiaalisesti ja laskentaverkko tihenee (Ingason *et al.*, 2014). DNS metodin vaatiman laskentatehon ja muistivaatimusten takia sillä on mahdotonta mallintaa suurempia virtausalueita ilman supertietokoneita, jonka takia sen käyttö on vielä rajoittunut vain muutamiin tutkimuskohteisiin (Tan, 2013).

LES-menetelmässä suurimmat pyörteet lasketaan suoraan käyttämällä hallitsevia yhtälöitä, mutta pienemmät pyörteet mallitetaan, jolloin laskettavien yhtälöiden määrä kasvaa. Mallinnuksen ansioista laskentaverkon ei kuitenkaan tarvitse olla niin tiheä, jonka takia laskentatehon vaatimus on huomattavasti pienempi kuin DNS-menetelmällä tarkkuuden pysyessä erittäin hyvänä (Ingason *et al.*, 2014). Junatunneleihin liittyviä tutkimuksia LES menetelmällä ovat tehneet esimerkiksi Camelli, 2014 ja Khayrullina, 2015.

RANS-menetelmällä turbulenssi mallinnetaan kokonaisuudessaan laskemalla hallitsevista yhtälöistä erikseen aikakeskiarvot ja heiluvat arvot. FANS-menetelmässä

lasketaan aikakeskiarvojen sijaan painotettuja keskiarvoja, joka on käytännöllisempää kokoonpuristuvissa virtauksissa (Ingason *et al.*, 2014). Molemmilla menetelmillä on mahdollista tehdä virtauslaskentaa tehokkaasti sopivalla tarkkuudella monissa käytännön sovelluksissa ja niihin perustuen on kehitetty useita numeerisia malleja, joista junatunneleihin liittyvissä tutkimuksissa on käytetty esimerkiksi RANS standardi  $k - \epsilon$  (Kim, J. Y. ja Kim, 2007; Kim, J. Y. ja Kim, 2009; Colella, 2009; López González, 2014; Yang, 2015),  $k - \epsilon$  RNG (Cross, 2015) sekä RANS SST  $k - \omega$  (Juraeva, 2011) -malleja. RANS  $k - \epsilon$  -mallin heikkoutena on esimerkiksi, että se olettaa turbulenssin isotrooppiseksi eli suunnasta riippumattomaksi (Autodesk, 2018), ei ratkaise hyvin tilanteita, joissa virtaus on painekentän vastaista eli virtaus kulkee kohti suurempaa painetta eikä tilanteita, joissa virtauksen pitäisi irrota jostain seinämästä geometrian muutoksen takia (Juraeva, 2011). Lisäksi mallin yhteydessä käytettävät seinämäfunktiot eivät välttämättä kuvaa virtauskenttää kovinkaan tarkasti (Colella, 2009).  $k - \epsilon$  -malli on kuitenkin yksinkertaisuutensa takia robusti, saatavilla melkein kaikissa kaupallisissa virtauslaskentaohjelmistoissa sekä tutkimusten perusteella osoittautunut hyväksi tavaksi laskea junatunneleissa esiintyviä suuren Reynoldsin luvun virtauksia, jonka takia se on tässä työssä käytetty turbulenssimalli.

RANS mallissa aikakeskiarvo lasketaan kaikille ajassa muuttuville muuttujille, jolloin esimerkiksi x-suuntainen nopeus  $u$  muuttuu yhtälön 29 muotoiseksi (Autodesk, 2018).

$$u = U + u' \quad (29)$$

missä  $U$  on nopeuden keskiarvo [ $m/s$ ]  
 $u'$  on heilahteleva arvo [ $m/s$ ]

Edellä oleva notaatio sijoitetaan hallitseviin yhtälöihin, jotka lisäksi keskiarvotetaan ajan suhteen. Merkitsemällä keskiarvoa isolla kirjaimella ja heilahtelevaa arvoa pienellä kirjaimella hallitsevat yhtälöt voidaan merkitä seuraavassa muodossa alkaen jatkuvuusyhtälöstä 30 liikemäärän yhtälöihin 31, 32 ja 33 sekä energiayhtälöön 34. Energiayhtälössä lämpötilan heiluvaa termiä on merkitty pienen kirjaimen sijaan notaatiolla  $T'$  (Autodesk, 2018).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (30)$$

X-suuntaisen liikemäärän yhtälö.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} + \rho W \frac{\partial U}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + S_\omega + S_{DR} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial U}{\partial x} - \rho uu \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \rho uv \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \rho uw \right] \end{aligned} \quad (31)$$

Y-suuntaisen liikemäärän yhtälö.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} + \rho W \frac{\partial V}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + S_\omega + S_{DR} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \rho uv \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \rho vv \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \rho vw \right] \end{aligned} \quad (32)$$

Z-suuntaisen liikemäärän yhtälö.

$$\rho \frac{\partial W}{\partial t} + \rho U \frac{\partial W}{\partial x} + \rho V \frac{\partial W}{\partial y} + \rho W \frac{\partial W}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + S_\omega + S_{DR} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) - \rho u w \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) - \rho v w \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial W}{\partial y} - \rho w w \right] \quad (33)$$

Energiayhtälö.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p U \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p W \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} - \rho C_p u T' \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} - \rho C_p v T' \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} - \rho C_p w T' \right] + q_v \quad (34)$$

missä  $T'$  on lämpötilan heilahteleva arvo [K]

Keskiarvotetuissa yhtälöissä heilahtelevia muuttujia sisältäviä termejä kutsutaan Reynoldsin jännitystermeiksi. Tunteamattomien muuttujien mallintamiseksi voidaan käyttää esimerkiksi Boussinesqin approksimaatiota, joka määrittelee liikemääräyhtälöille pyörreviskositeetin ja energiayhtälölle pyörrejohtavuuden yhtälöiden 35 ja 36 mukaisesti. Approksimaatio johtaa siihen, että malli olettaa turbulenssin isotrooppiseksi eli suunnasta riippumattomaksi (Autodesk, 2018).

$$\mu_t = \frac{-\rho u u}{2 \frac{\partial U}{\partial x}} = \frac{-\rho u v}{\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x}} = \frac{-\rho v w}{\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y}} = \dots \quad (35)$$

missä  $\mu_t$  on pyörreviskositeetti [Pa s]

$$k_t = \frac{-\rho C_p u t}{\frac{\partial T}{\partial x}} = \frac{-\rho C_p v t}{\frac{\partial T}{\partial y}} = \frac{-\rho C_p w t}{\frac{\partial T}{\partial z}} \quad (36)$$

missä  $k_t$  on pyörrejohtavuus [J/mK<sup>2</sup>]

Tätä approksimaatiota käyttämällä hallitsevat yhtälöt muuttuvat yhtälöissä 37-41 esitettyyn muotoon (Autodesk, 2018).

Jatkuvuusyhtälö.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} = 0 \quad (37)$$

X-suuntaisen momentin yhtälö.

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} + \rho W \frac{\partial U}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + S_\omega + S_{DR} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ 2(\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] \quad (38)$$

Y-suuntaisen momentin yhtälö.

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} + \rho W \frac{\partial V}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + S_\omega + S_{DR} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2(\mu + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] \quad (39)$$

Z-suuntaisen momentin yhtälö.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial W}{\partial t} + \rho U \frac{\partial W}{\partial x} + \rho V \frac{\partial W}{\partial y} + \rho W \frac{\partial W}{\partial z} &= \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + S_\omega + S_{DR} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2(\mu + \mu_t) \frac{\partial W}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (40)$$

Energiayhtälö.

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p U \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p W \frac{\partial T}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (k + k_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (k + k_t) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + q_v \end{aligned} \quad (41)$$

Yhtälöiden tässä muodossa ainoat turbulenssin luomat lisämuuttujat ovat pyörreviskositeetti ja pyörrejohtavuus.  $k - \epsilon$  -mallissa ne määritellään yhtälöiden 42 ja 43 mukaisesti (Autodesk, 2018).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon} \quad (42)$$

missä  $C_\mu$  on empiirinen vakio  $[-]$   
 $K$  on kineettinen energia  $[J]$   
 $\epsilon$  on energian häviö  $[J/s]$

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} \quad (43)$$

missä  $\sigma_t$  on turbulentti Prandltin numero  $[-]$

Kineettiselle energialle ja energian häviön siirtyminen määritellään Navier-Stokes liikemääräyhtälöiden mukaisilla yhtälöillä 44 ja 45 (Autodesk, 2018).

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho U \frac{\partial K}{\partial x} + \rho V \frac{\partial K}{\partial y} + \rho W \frac{\partial K}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] - \rho \epsilon + \\ \mu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] - C_{2\rho} \frac{\epsilon^2}{K} + \end{aligned}$$



$$C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{K} \left[ 2 \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (45)$$

missä  $\sigma_K$  ja  $\sigma_\varepsilon$  ovat Schmidtin numeroita [-]  
 $C_1$  ja  $C_2$  ovat empiirisiä vakioita [-]

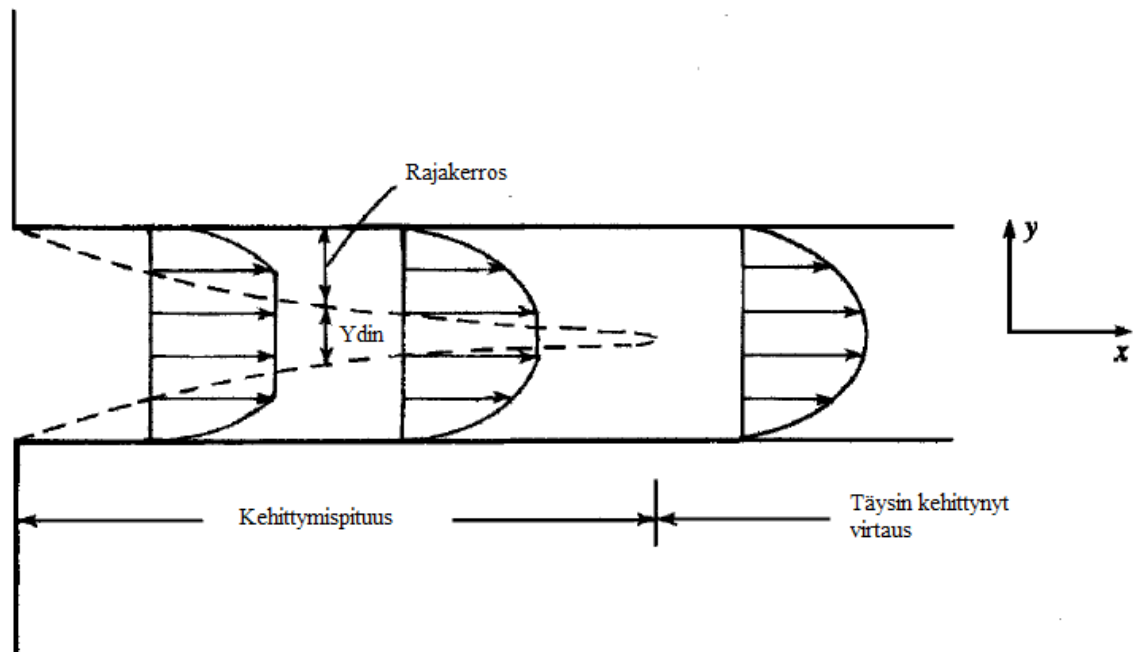
Vakioille käytetään yleensä samoja arvoja, jotka on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.  $k - \epsilon$  mallissa käytetyt vakiot (Autodesk, 2018).**

$\sigma_K$	$\sigma_\varepsilon$	$C_1$	$C_2$	$C_\mu$
1.0	1.3	1.44	1.92	0.09

### 3.5 Rajakerros

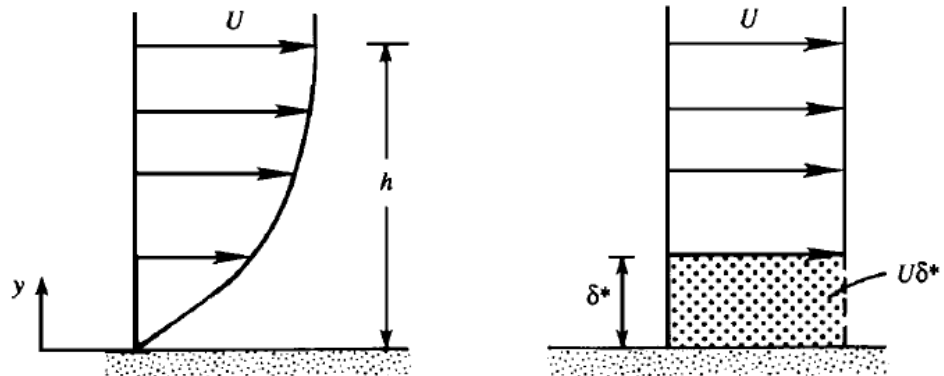
Virtaukset muodostavat niitä rajoittavien seinien läheisyyteen rajakerroksen, jossa viskoosit voimat vaikuttavat huomattavasti virtauksen ominaisuuksiin. Rajakerros on usein todella ohut, mutta se vaikuttaa paljon esimerkiksi kiinteiden kappaleiden ilmanvastukseen sekä fluidin ja kiinteän kappaleen väliseen lämmönsiirtoon. Rajakerroksessa fluidin nopeus on pienempi kuin sen ulkopuolella ja useimmissa tilanteissa oletetaan, että sen suhteellinen nopeus seinällä on nolla eli fluidi ei liu'u seinää pitkin. Kiinteiden seinien lisäksi rajakerroksia muodostuu suihkuvirtauksissa, jättövirtauksissa (eng. slipstream) sekä leikkauserroksissa, jos Reynoldsin luku on riittävän suuri. Rajakerroksen paksuus kasvaa virtaussuunnassa vaikuttaen virtauskenttään. Täysin kehittyneessä virtauksessa myöskään rajakerros ei enää muutu virtauksen suuntaisesti. Kuvassa 6 on esitys rajakerroksen kasvamisesta, kunnes virtaus on täysin kehittynyt (Kundu ja Cohen, 2008).



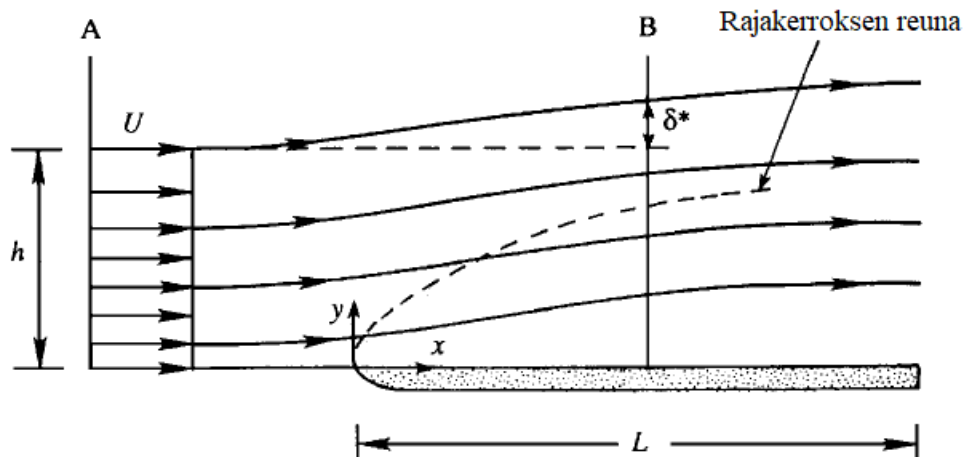
**Kuva 6. Virtauksen kehittyminen kanavassa, suomennettu (Kundu ja Cohen, 2008).**

Rajakerroksen paksuuden määrittelyyn on kolme tapaa. Ensimmäinen tapa on käyttää mielivaltaista nopeussuhdetta eli esimerkiksi määritetään, että rajakerros sijaitsee alueella, jossa virtauksen nopeus on 99 % vapaan virtauksen nopeudesta. Toinen tapa, joka on esitetty kuvassa 7 on määrittää syrjäytyspaksuus  $\delta^*$  eli se mitta, jota seinää täytyy

siirtää, jotta massavirta olisi sama kuin kitkattomalla virtauksella. Kolmas keino on määrittää liikemäärän paksuus  $\theta$  liikemäärän tiheyden  $\rho U^2 \theta$  avulla. Kuvassa 8 näkyy virtauksen kaartuminen rajakerroksen vaikutuksesta. Kaartumisesta huolimatta massavirran on säilyttävä, jonka perusteella voidaan määrittää rajakerroksen paksuus liikemäärän vuon avulla.

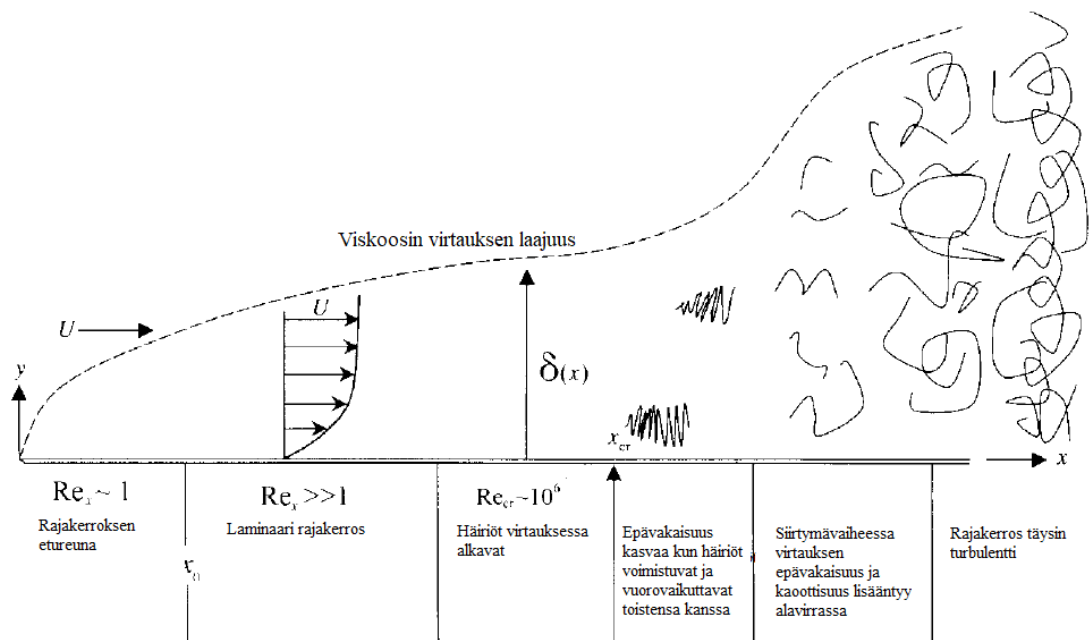


Kuva 7. Syrjäytyspaksuus (Kundu ja Cohen, 2008).



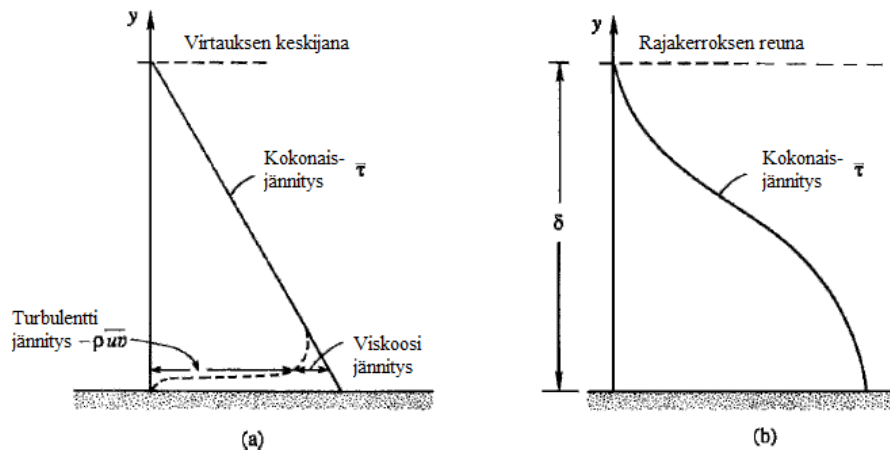
Kuva 8. Liikemäärän tiheyden säilyminen, suomennettu (Kundu ja Cohen, 2008).

Rajakerros voi olla joko koko seinän matkalla laminaarinen, turbulentti tai muuttua laminaarista turbulentiksi virtauksen Reynoldsin luvun kasvaessa virtaussuunnassa. Virtaus rajakerroksessa muuttuu turbulentiksi, kun se saavuttaa kriittisen Reynoldsin luvun, jonka suuruus riippuu seinämän pinnankarheudesta, rajakerroksen ulkopuolisen virtauksen vakaudesta sekä seinän etureunan (eng. leading edge) muodosta. Kuvassa 9 on esitetty rajakerroksen virtauksen muutos laminaarista turbulentiksi, kun virtaus saavuttaa kriittisen Reynoldsin luvun. Kuvasta havaitaan, että turbulentit rajakerrokset ovat paksumpia kuin laminaariset. Turbulenttien rajakerroksien ominaisuutena on lisäksi suurempi ilmanvastus ja lämmönsiirtokyky kuin laminaarisilla. Rajakerroksen matemaattinen esitys riippuu siitä minkä tyyppistä rajakerrosta käsitellään (Kundu ja Cohen, 2008).



Kuva 9. Rajakerroksen kehitys laminaarista turbulentiksi, suomennettu (Kundu ja Cohen, 2008).

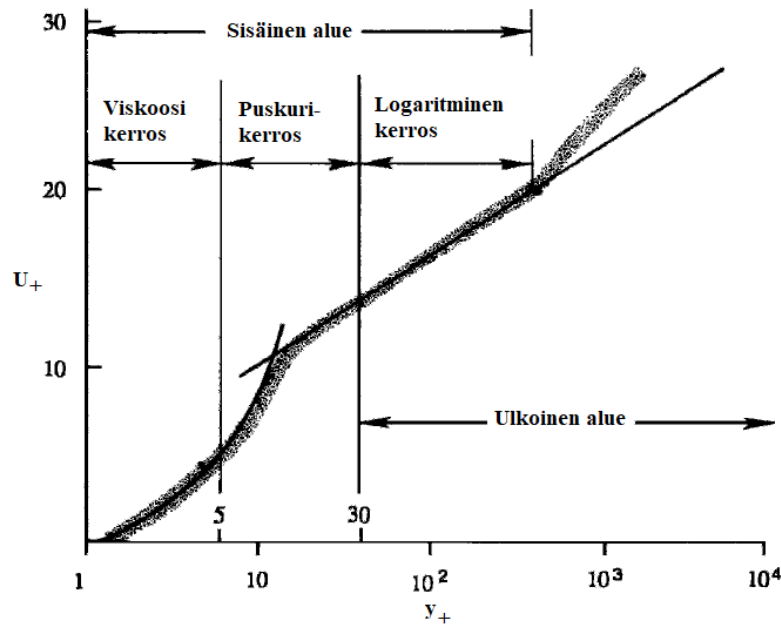
Turbulentissa rajakerroksessa painegradientti on usein niin pieni, että paine on käytännössä sama seinällä kuin rajakerroksen reunalla. Yhtenäinen painekenttä syntyy rajakerrokseen pelkästään kerroksen ulkopuolisesta virtauksesta. Lisäksi kuvasta 10 huomataan, että turbulentille virtaukselle ominaiset Reynoldsin jännitteet muuttuvat rajakerroksessa häviävän pieniksi verrattuna viskooseihin jännitteisiin (Kundu ja Cohen, 2008).



Kuva 10. Leikkausjännityksen vaihtelu virtaavan (a) kanavan ja (b) rajakerroksen poikki, suomennettu (Kundu ja Cohen, 2008).

Junatunneleissa virtauksien Reynoldsin luku on korkea, jonka takia virtauslaskennassa on käytännöllistä soveltaa turbulenttia rajakerrosta kuvaavaa seinämälakia (Cross, 2015). Turbulentin rajakerroksen nopeuskenttä ei kehity lineaarisesti, jonka takia seinämälaisissa turbulentti rajakerros jaetaan osiin: rajakerroksen sisäisen alueeseen lähellä seinämää ja ulkoiseen alueeseen lähellä rajakerroksen reunaa. Lisäksi sisäinen alue jaetaan viskoosiin alueeseen, puskurialueeseen sekä logaritmiseen alueeseen. Dimensionalyyysin avulla

määritellään dimensioton etäisyys  $y^+$  ja dimensioton nopeus  $U^+$ , joiden avulla edellä mainittu jako on esitetty kuvassa 11.  $y^+$  ja  $U^+$  on esitetty yhtälöissä 46 ja 47.



Kuva 11. Turbulentti rajakerros, suomennettu (Kundu ja Cohen, 2008).

$$y^+ = \frac{\delta \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}}{\nu} \quad (46)$$

missä  $\delta$  on etäisyys seinästä [m]

$$U^+ = \frac{U_t}{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}} \quad (47)$$

missä  $U_t$  on seinän nopeustangentti [m/s]  
 $\tau_w$  on leikkausjännitys seinällä [Pa]

Seinämälaki olettaa viskoosissa kerroksessa  $0 \leq y^+ \leq 5$ , että seinämä on sileä ja että virtauksen nopeusprofiili riippuu pelkästään fluidin tiheydestä, leikkausjännityksestä seinällä, kinemaattisesta viskositeetista sekä etäisyydestä seinämästä. Viskoosissa kerroksessa fluidiin vaikuttaa pelkästään viskoosi leikkausjännitys ja nopeusprofiili voidaan kuvata lineaarisella yhtälöllä 48 (Kundu ja Cohen, 2008).

$$U^+ = y^+ \quad (48)$$

Puskurikerroksessa  $5 \leq y^+ \leq 30$  virtauksen nopeusprofiiliin vaikuttaa merkittävästi sekä viskoosit voimat että Reynoldsin jännitteet. Logaritmisessa kerroksessa  $30 \leq y^+ \leq 300$  Reynoldsin jännitteet ovat merkittävämmässä asemassa kuin viskoosit jännitteet ja nopeusprofiili määritetään yhtälössä 49 esitetyn logaritmisin lain avulla (Kundu ja Cohen, 2008). Virtauslaskennassa seinän viereisen kopin tulisi olla riittävän pieni, että sen reuna sijaitsee logaritmisella alueella, jolloin seinämän virtauskenttä on mahdollista laskea riittävällä tarkkuudella (Cross, 2015). Autodeskin suosittelema arvo on  $35 \leq y^+ \leq 350$  (Autodesk, 2018).

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log y^+ + B \quad (49)$$

missä  $\kappa$  on dimensioton vakio [–]  
 $B$  on dimensioton vakio [–]

Ulkoisella alueella virtauksen nopeusprofiilin poikkeavuus johtuu käytännössä kokonaan Reynoldsin jännitteistä, jonka takia virtaus käyttäytyy samalla tavoin kuin seinämästä vapaa virtaus (Kundu ja Cohen, 2008).

Lämmönsiirto seinän rajakerroksessa määritellään vastaavasti dimensiottoman arvon  $T^+$  avulla yhtälön 50 ja 51 avulla. Yhtälössä turbulentiksi Prandtin luvuksi  $\sigma_t$  Autodesk CFD 2019 asettaa kaasuille, kuten ilmalle arvon 1.0, mutta laminaari Prandtin luku  $\sigma_L$  määritellään yhtälön 52 avulla.

$$T^+ = \sigma_L U + \frac{\sigma_T - \sigma_L}{\kappa} S_V \log \left[ \frac{1}{\sigma_L} + \frac{1}{\sigma_T} \left( \kappa e^{-\kappa B} \left( 1 + 0.3 \frac{r S_V}{\nu} \right) e^{\kappa \frac{U}{S_V}} \right) \right] \quad (50)$$

missä  $\sigma_L$  on laminaarinen Prandtl luku [–]

$$T^+ = \frac{c_p \delta \tau_w}{k_w} \quad (51)$$

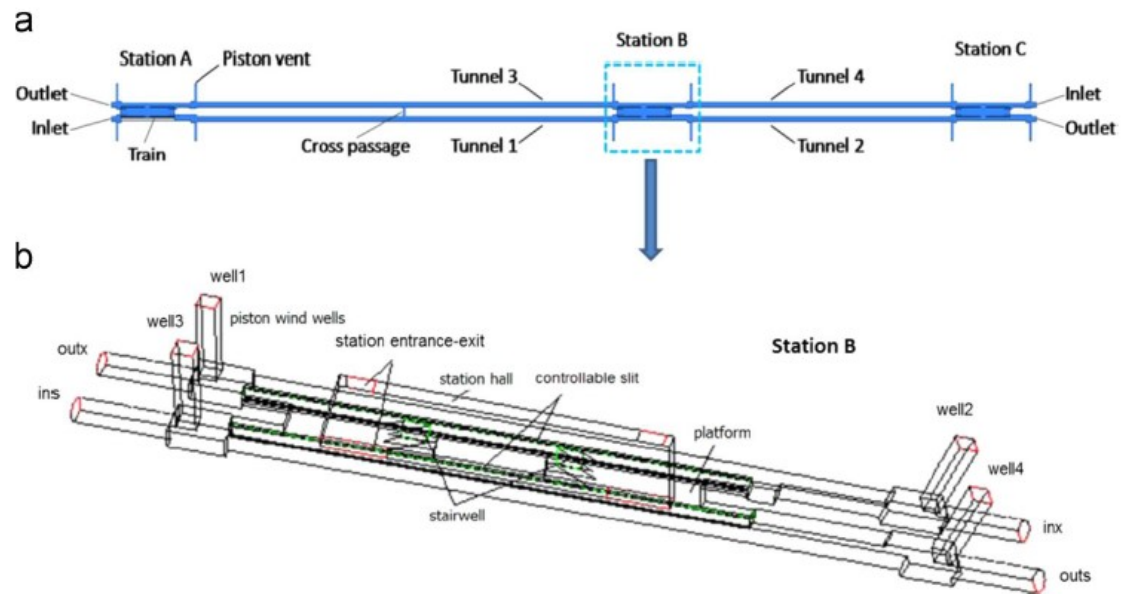
missä  $k_w$  on lämmön johtuminen rajakerroksessa [ $W/sK$ ]

$$\sigma_L = \frac{c_p \mu}{k} \quad (52)$$

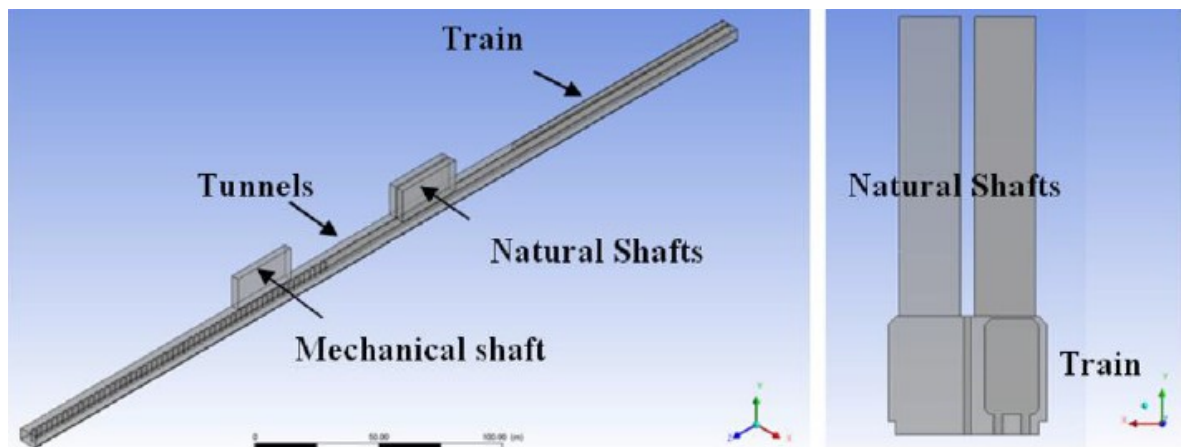
### 3.6 Geometrinen malli

Kaksi- ja kolmiulotteisessa virtauslaskennassa fluidi kulkee usein ennalta määritellyn geometrian läpi. Monimutkaiset geometriamallit luodaan usein virtausmallinnusohjelmistosta erillisellä tietokoneavusteisella suunnitteluohjelmistolla eli CAD (eng. Computer aided design) -ohjelmistolla. Autodesk CFD 2019 ohjelmistolle geometrian voi luoda käytännössä millä vain Autodeskin piirtämisen tarkoitetulla CAD-ohjelmistolla. Usein virtausmallinnettavan alueen geometriamalli onkin luotu valmiiksi muun suunnittelun yhteydessä ja virtausmallinnuksella vain varmistetaan tuotteen toimivuus tai kehitetään olemassa olevaa mallia. Käytetty CAD-ohjelma riippuu silloin siitä mikä toimiala on kyseessä. Rakennusosalalla käytettyjä Autodeskin ohjelmistoja ovat esimerkiksi AutoCAD ja Revit, joista molemmat soveltuvat Autodesk CFD 2019 geometriamallin luomiseen (Autodesk, 2018).

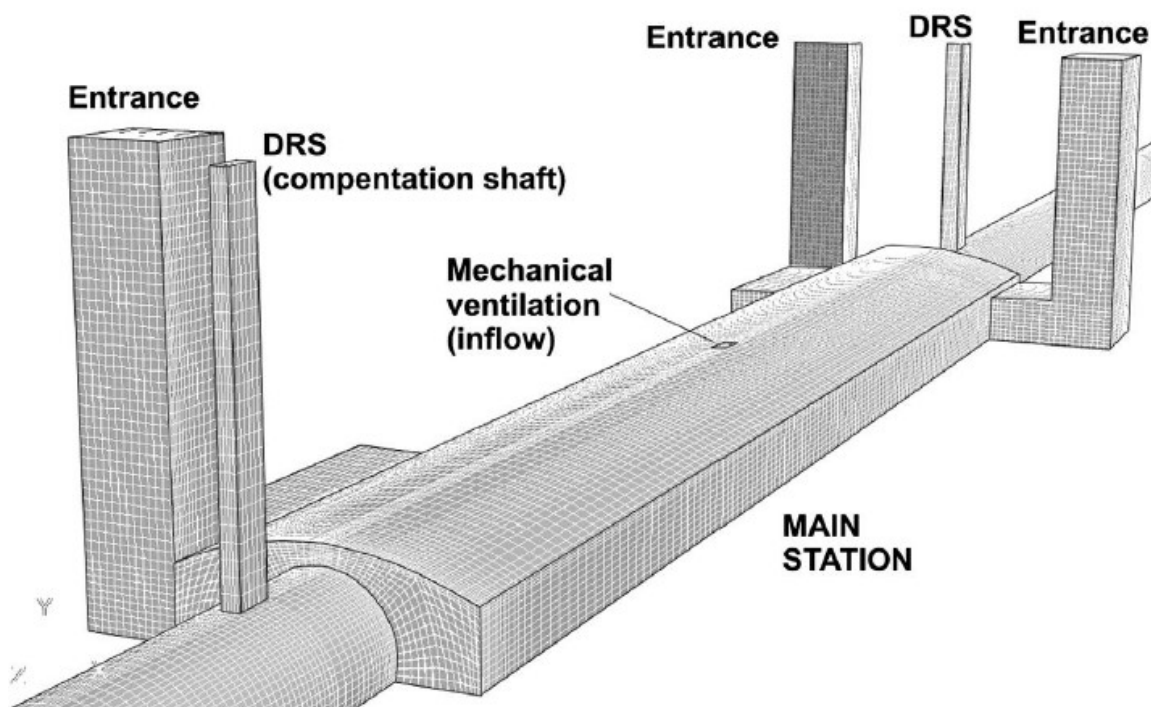
Junatunneleita koskevissa tutkimuksissa tunnelin geometriamalli perustuu joko olemassa oleviin tunneleihin tai esimerkiksi tunnelien suunnitteluohjeistuksissa mainittuihin dimensioihin. Geometrit ovat todellisiin muotoihin verrattuna yksinkertaistettuja, koska monimutkaiset muodot hidastavat laskemista ilman, että ne vaikuttavat merkittävästi lopullisiin tuloksiin. Kuvissa 12, 13 ja 14 on esimerkki tutkimuksissa käytetyistä geometrioista. Tunnelit ja junat mallinnetaan usein poikkileikkaukseltaan joko neliskanttisiksi tai pyöreiksi, jolloin laskemisessa on mahdollista käyttää sylinterikoordinaatistoa. Laskenta-alue kolmiulotteisessa mallinnuksessa on korkeintaan muutamia satoja metrejä pitkä osa kokonaisesta tunnelista, koska kokonaisen junatunnelijärjestelmän mallintamiseen vaadittava laskenta-aika on todella suuri. Toisaalta geometrian on oltava riittävän pitkä, jotta reunaehtojen sijainti ei heikennä laskentatuloksia (Colella, 2009; Yang, 2015; Juraeva, 2011).



Kuva 12. 2D- ja 3D-malli junatunnelista (Yang, 2015).



Kuva 13. 3D-malli junatunnelista (Juraeva, 2011).



Kuva 14. 3D-malli junatunnelista (López González, 2014).

Tutkimusten alkuvaiheessa virtausmallia testataan usein kaksikulotteisella tapauksella ja pienemmäksi skaalatulla kolmiulotteisella mallilla. Näiden käyttö lyhentää laskenta-aikaa, jolloin on helpompi selvittää todellisissa tutkimuksissa käytettävät laskentaparametrit. Moniin perinteisiin virtauslaskennan sovelluksiin verrattuna junatunneleiden laskenta-alue on todella suuri, jonka takia pienoismallien hyödyntäminen myös lopullisissa tutkimuksissa on perusteltua. Pienoismallilaskennassa geometrian skaalaamisen lisäksi fluidin ominaisuuksia on muutettava, jotta virtausolosuhteet pysyvät yhtenäisinä todellisen mallin kanssa. Skaalaamista varten hyödynnetäänkin dimensiottomia lukuja, kuten esimerkiksi Reynoldsin lukua ja Machin lukua, joiden avulla pyritään saamaan pienoismallin virtausolosuhteet samankaltaisiksi kuin todellisen mallin (Cross, 2015; Kim, J. Y. ja Kim, 2009; Kim, J. Y. ja Kim, 2007).

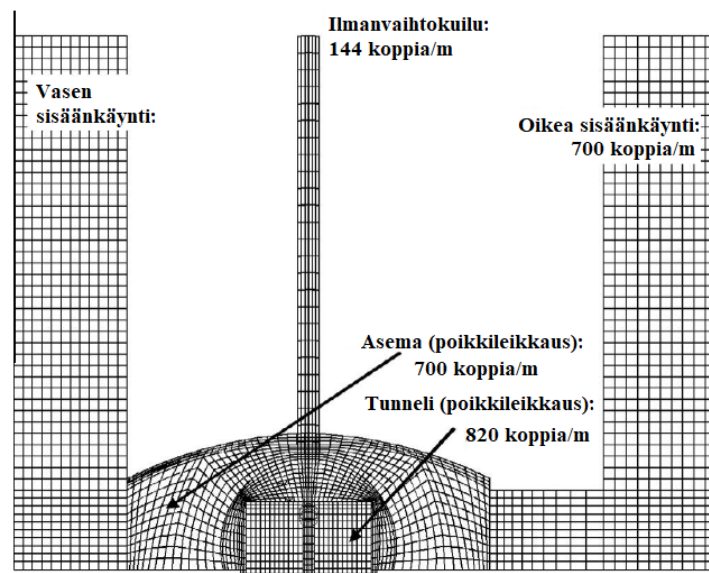
### 3.7 Laskentahila

Geometrian mallinnuksen jälkeen laskenta-alueelle luodaan hila eli geometrinen laskentaverkko. Hilan luominen on käytännössä laskenta-alueen spatiaalista diskretointia eli jakamista äärellisen kokosiin koppeihin, joiden määrittämissä solmupisteissä hallitsevat yhtälöt ratkaistaan. Laskentahilan tiheys vaikuttaa merkittävästi virtauslaskennan tarkkuuteen ja vaadittuun laskentatehoon. Karkeassa verkossa tietoa virtauksesta häviää enemmän kuin tiheimmässä, jolloin tarkkuus kärsii. Toisaalta tiheämpi verkko vaatii tietokoneelta enemmän muistia, koska edellisten aika-askeleiden tiedot on pystyttävä säilyttämään hetkellisesti seuraavan askeleen laskemista varten ja aika-ajoin säilöämään pysyvästi lopullisten tulosten tarkastelua varten. Hilan luomisessa on siis tasapainoteltava laskennan tarkkuuden ja vaadittavien resurssien välillä (Peyret, 1996).

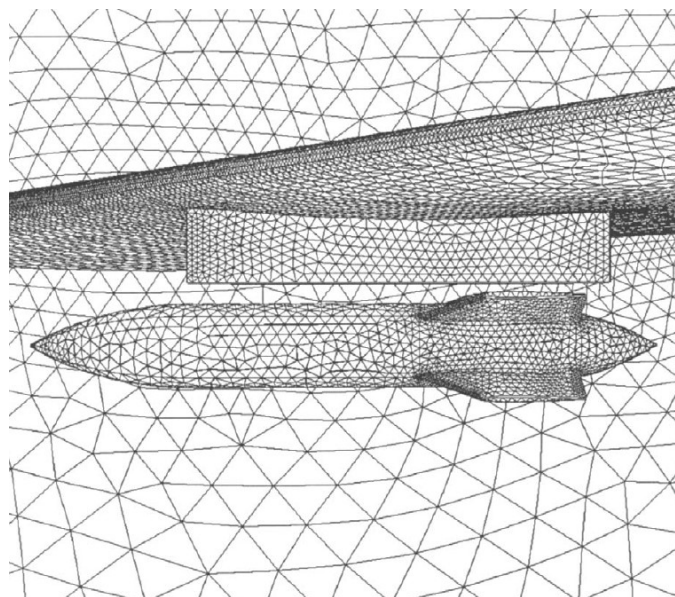
Junatunneleiden virtauslaskennassa hilat ovat tavanomaisesti joko rakenteellisia tai rakenteettomia (Kim, J. Y. ja Kim, 2007). Rakenteelliset hilat sopivat pääasiassa hyvin yksinkertaisille geometrioille. Siinä laskenta-alue jaetaan säännöllisiin usein suorakulmaisiin tai heksaedrin muotoisiin osiin ja osien määrä pysyy kussakin



koordinaattisuunnassa samana koko laskenta-alueella. Osien koko voi kyllä vaihdella mutta muutokset ovat jatkuvia ja linkittyvät viereisiin koppeihin. Säännöllinen rakenne nopeuttaa laskentaa, koska siihen voi soveltaa yksinkertaisia matriisimenetelmiä ilman, että hilapisteiden keskinäisiä sijainteja määritellään ja tallennetaan erikseen (Peyret, 1996). Kuvassa 15 on poikkileikkaus López González, 2014 käyttämästä rakenteellisesta hilasta. Rakenteettomassa hilassa geometria jaetaan epäsäännöllisiin usein kolmion tai tetraedrin muotoisiin osiin. Monimutkaisemman geometrian kuvaaminen tällaisella verkolla on helpompaa, mutta verkon epäsäännöllisyyden takia laskenta monimutkaistuu ja hilapisteiden keskinäiset sijainnit on tallennettava. Kuvassa 16 on esimerkki rakenteettomasta hilasta. Vaikka tapana on usein käyttää rakenteellisessa hilassa suorakulmaisia ja rakenteettomassa kolmiomaisia osia eivät ne välttämättä määritä sitä onko hila rakenteellinen vai rakenteeton. Rakenteettomassa hilassa on mahdollista käyttää myös heksaedrin muotoisia osia ja rakenteellisessa säännöllisesti jakautuneita tetraedrin muotoisia osia (Peyret, 1996). Autodesk CFD 2019 ohjelmistolla luotu hila on rakenteeton ja muodostuu tetraedreistä (Autodesk, 2018).



Kuva 15. Rakenteellinen hila, suomennettu (López González, 2014).

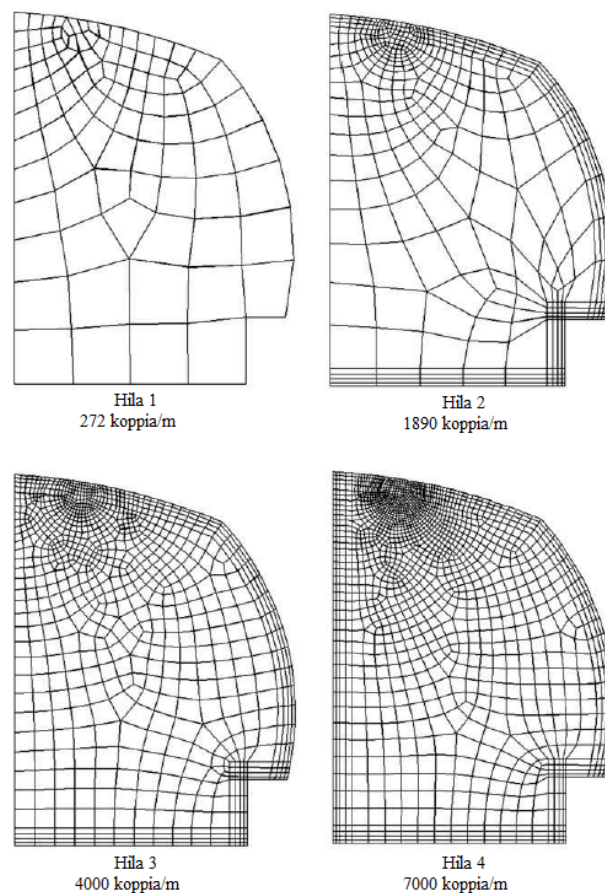


Kuva 16. Rakenteeton hila (Peyret, 1996).



Hilan luominen on työläs ja iteratiivinen prosessi. Usein mallinnuksen alkuvaiheessa luodaan karkea hila, jonka avulla kokeillaan asetettujen parametrien toimivuutta. Tämän jälkeen hilaa tihennetään, kunnes saavutetaan laskentatulosten riippumattomuus laskentakoppien koosta. Autodesk CFD 2019 -ohjelmistolla on mahdollista luoda rakenteeton tetraedreistä muodostuva hila joko automaattisesti tai manuaalisesti määrittämällä valitun alueen koppien koko. Lisäksi staattisia tilanteita mallinnettaessa ohjelmalla voi automaattisesti mukauttaa hilaverkkoa laskentatulosten tarkentamiseksi. Käytännössä automaattiset hilanluontimenetelmät ovat soveltuvia mallinnuksen alkuvaiheeseen, jolloin kokeillaan parametrien toimivuutta, mutta tarkempien tulosten saamiseksi käyttäjän on usein muokattava automaattisesti luotua hilaa tai luotava hila kokonaan manuaalisesti itse.

Junatunnelin hilaa luodessa on tärkeää kiinnittää huomioita rajakerrosten tarkkaan mallinnukseen. Kiinteiden pintojen vieressä olevien koppien on oltava esimerkiksi seinämälakia soveltavissa malleissa dimensiottoman etäisyyden  $30 \leq y^+ \leq 300$  sisällä. Siksi hila on tunnelin seinämillä ja junan läheisyydessä paljon tiheämpi kuin muualla. Yleisesti oikea hilakoko selvitetään vertaamalla jotain laskentamallin laskemaa arvoa esimerkiksi fluidin nopeutta tietyissä laskentapisteissä eri hilakokojen välillä. Oikea hilakoko on löytynyt, kun arvot eivät enää poikkea toisistaan huomattavasti. Kuvassa 17 on Colella, 2009 tutkimuksessa suoritettu hilakoon vertailu. Tutkimuksen perusteella sopiva hilakoko  $k - \epsilon$  turbulenssimallilla oli 4000 koppia jokaista tunnelin pituutta kuljettua metriä kohden eli kuvassa hilakoko 3. Kuvasta on tunnistettavissa myös, että hilakokoa on tihennetty seinillä ja katossa impulssipuhaltimen kohdalla. Hilaa kannattaakin tihentää seinien lisäksi sellaisilla alueilla, jotka todennäköisesti vaikuttavat virtauskenttään huomattavasti ja joista halutaan tarkkaa tietoa.



**Kuva 17. Hilakoon vertailu tunnelin poikkileikkauksessa (Colella, 2009).**

### 3.8 Reunaehdot

Hallitsevat yhtälöt ovat käytännössä massan, liikemäärän ja energian säilymistä kuvaavia yhtälöitä, jonka takia ne tarvitsevat laskenta-alueen rajoilla reunaehdot, joiden mukaan virtauskenttä muodostuu. Reunaehdot määrittävät taseiden lisäksi sen, kuinka fluidi käyttäytyy esimerkiksi kiinteiden aineiden rajapinnoilla ja kuinka energiaa ja massaa vaihtuu laskenta-alueen ja ympäristön välillä. Virtauslaskennassa reunaehdot ovat joko staattisia arvoja tai jonkun virtausparametrin, kuten paineen gradientteja eli kuvaavat kyseisen parametrin muutosta alueen reunalla. Reunaehdot voivat olla myös ajan suhteen pysyviä tai muuttuvia (Kundu ja Cohen, 2008).

Junatunneleiden reunaehtoien määrittäminen voi olla haasteellista, koska tunnelit ovat usein niin pitkiä, että niistä mallinnetaan vain tietty osa. Silti mallinnettavan alueen reunoilta on saatava jonkinlaista tietoa, jonka avulla reunaehdot rajapinnoille voidaan määrittellä. Yksi tapa tuottaa hyviä reunaehtoja on mallintaa koko tunneli yksi- tai kaksiulotteisesti ja valita kolmiulotteiset laskenta-alueen rajat niin, että täysin kehittyneen virtauksen oletus ei tuota suurta virhettä, kuten esimerkiksi kaukana paineentasauskuiluista, impulssipuhaltimista tai muusta virtaukseen vaikuttavasta tekniikasta (Colella, 2009; Yang, 2015). Reunaehdoiksi voidaan määrittellä staattinen paine nolllaksi kaikilla tunnelin suuaukoilla, jos tarkoituksena on mallintaa ainoastaan junan tuottamia virtauksia laskenta-alueen sisällä, jolloin dynaaminen paine voi kuitenkin muuttua junan vaikutuksesta (Cross, 2015; Kim, J. Y. ja Kim, 2007). Tunnelin seinämällä fluidin nopeus asetetaan nolllaksi, jolloin fluidin liukuminen sitä pitkin estetään (Yang, 2015). Lämmön siirtymistä varten fluidille ja seinämille voidaan asettaa lämpötila ja määrittellä lämmönsiirtokerroin (Autodesk, 2018).

Myös kineettiselle energialle ja energian häviölle on oltava reunaehto laskennan alussa. Reunaehto voi kuitenkin olla hankalaa määrittää tarkasti, jonka takia on käytettävä jonkinlaista approksimaatiota. Autodesk CFD 2019 approksimoi turbulentsin kineettisen energian laskenta-alueen rajapinnan virtausnopeuden perusteella. Approksimaatiota varten turbulentsin kineettinen energia määritellään yhtälön 53 mukaisesti. Lisäksi määritellään turbulenssille intensiteetti yhtälön 54 mukaisesti. Intensiteetti on itsessään helpompi määrittää arvaamalla kuin kineettinen energia, koska se on vain virtauksen keskiarvotetun ja heilahtelevan nopeuden suhde eikä alkuarvaus vaikuta merkittävästi virtaukseen kaukana rajapinnalta. Kineettisen energian raja-arvo määritellään kahden edellisen yhtälön avulla yhtälössä 55 (Autodesk, 2018).

$$K = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (53)$$

missä  $u$ ,  $v$  ja  $w$  ovat keskiarvotetun nopeuden heilahtelevat komponentit [ $m/s$ ]

$$I = \frac{u}{U} = \frac{v}{V} = \frac{w}{W} \quad (54)$$

$$K = \frac{1}{2}[(IU)^2 + (IV)^2 + (IW)^2] \quad (55)$$

Turbulentsin energian häviäminen määritellään ohjelmassa karakteristisen pituusluokan  $\delta_s$  avulla yhtälön 56 mukaisesti. Pituusluokan suuruuteen vaikuttaa onko virtaus suljetun vai avoimen geometrian sisällä (Autodesk, 2018).

$$\varepsilon = C_\mu \frac{K^{1.5}}{\delta_s} \quad (56)$$

missä  $\delta_s$  on pituusluokka [–]

### 3.9 Numeeriset menetelmät

Numeerisilla menetelmillä tarkoitetaan osittaisderivaattayhtälöiden aika- ja paikkadifferentiaalien jakamista äärellisiin väleihin ja ratkaisemista laskentaverkon määrittämissä solmupisteissä. Virtauslaskennassa numeeriset menetelmät voidaan jakaa FDM eli äärellisten erotusten (eng. Finite Difference Method), FVM eli äärellisten tilavuuksien (eng. Finite Volume Method) sekä FEM eli äärellisten elementtien (eng. Finite Element Method) menetelmiin. Äärellisten erotusten menetelmässä virtausparametrien arvoja arvioidaan korvaamalla hallitsevissa yhtälöissä esiintyvä etäisyysdifferentiaali laskentaverkon solmupisteiden välisillä etäisyyksillä. Äärellisten tilavuuksien menetelmässä virtausparametrit säilötään tilavuusintegraalin omaisesti koppien sisälle. Koppien seinien läpi kulkeva vuo määrittää siten parametrien muutokset koppien välillä, jolloin koppien sisäinen tase perustuu siis siihen, kuinka paljon fluidia virtaa sisään ja ulos kopin seinämien läpi (Peyret, 1996). Äärellisten elementtien menetelmässä hallitsevat yhtälöt kerrotaan painofunktiolla ja integroidaan pinta-alan tai tilavuuden yli, jonka jälkeen muuttujat esitetään elementin sisällä painofunktion kanssa yhdenmuotoisen interpolaatiofunktion (muotofunktion) avulla (Autodesk, 2018).

Numeerisissa menetelmissä virheen suuruus syntyy siitä, kuinka monta muuta solmupistettä käytetään yhden solmupisteen yhtälöiden ratkaisemiseen. Esimerkiksi äärellisten etäisyyksien menetelmässä siis siitä kuinka suurina solmupisteiden väliset etäisyydet ovat. Ajan suhteen ratkaisuihin syntyy heiluntaa, jos yhtälöt ratkaistaan käyttämällä eksplisiittisiä eli edelliseen aika-askeleeseen kuuluvia termejä eikä implisiittisiä eli nykyhetkeen kuuluvia termejä. Numeerisissa menetelmissä taseyhtälöihin lisätään jäännöstermi, joka kuvaa menetelmän tarkkuutta. Esimerkiksi systeemeissä, jossa virtausalue ei luovuta energiaa tai ainetta ympäristön kanssa fluidin liikemäärä, lämpöenergia sekä massa säilyy laskenta-alueella, jolloin jäännöstermi kuvaa sitä määrää, joka taseissa on hävinnyt numeerisen menetelmän epätarkkuuden vaikutuksesta. Ratkaisu on supistunut, jos ratkaistavien taseyhtälöiden jäännöstermit lähentyvät nollaa (Peyret, 1996). Numeerinen menetelmä on konsistentti, jos yhtälöiden diskreetti muoto supistuu alkuperäiseen osittaisdifferentiaalimuotoon, kun ajan ja etäisyyden arvot lähenevät nollaa. Ratkaisu on vakaa, jos numeerinen ratkaisu ei heilahtele tai siinä ei vaikuta spontaaneja häiriöitä (Kundu ja Cohen, 2008).

Laskentaongelmaan hyvin soveltuva numeerinen menetelmä ratkaisee ongelman vakaasti ja tarkasti. Virtauslaskennassa hallitsevat yhtälöt ovat epälineaarisia eivätkä laskenta-alueiden dimensiot ole tarpeeksi säännöllisiä, jotta pelkästään etäisyyksiin pohjautuvalla äärellisten erotusten menetelmällä olisi aina mahdollista saada tarpeeksi pieniä jäännöstermejä, jonka takia CFD-ohjelmistoissa käytetään pääasiassa äärellisiin tilavuuksiin tai äärellisiin elementteihin pohjautuvia menetelmiä (Peyret, 1996). Äärellisten tilavuuksien menetelmä on rakenteellisilla hiloilla tehokas ja useimpien kaupallisten ohjelmistojen suosima menetelmä. Menetelmän vahvuutena virtauslaskennassa on lisäksi se, että vuot kuvaavat hyvin fysikaalisesti fluidien käyttäytymistä. Toisaalta tetraedrin muotoisissa automaattisesti luoduissa rakenteettomissa hiloissa koppien välisten voiden lukumäärä ja vaaditun muistin määrä kasvaa, jonka takia monimutkaisissa geometrioissa äärellisten tilavuuksien menetelmä voi olla raskas. Äärellisten elementtien menetelmä ei kuvaa matemaattisesti mitään fysikaalista ilmiötä kuten äärellisten tilavuuksien menetelmä, mutta se soveltuu hyvin monimutkaisten geometrioiden mallintamiseen ja on käytännöllinen rakenteettomilla

automaattisesti luoduilla hiloilla. Autodesk CFD 2019 -ohjelmisto perustuu äärellisten elementtien menetelmään (Autodesk, 2018).

Konvektiiviset termit kuten nopeus ja lämpötila ovat luonteeltaan epälineaarisia, jonka takia ne vaativat erillisen numeerisen menetelmän edellä kuvailtujen menetelmien lisäksi. Äärellisten tilavuuksien menetelmän yhteydessä junatunneleita käsittävissä tutkimuksissa on käytetty konvektiivisten termien diskretointiin esimerkiksi QUICK-menetelmää (Cross, 2015) ja toisen kertaluokan ylävirta (eng. upwind) -menetelmää (Kim, J. Y. ja Kim, 2007; Colella, 2009). Laskentamenetelmän kertaluokka merkitsee käytännössä sitä, kuinka monta muuta pistettä laskettavaa pistettä kohdin käytetään. Yleisesti menetelmissä kertaluokan kasvaminen lisää tulosten tarkkuutta, mutta hidastaa laskemista ja voi heikentää laskennan vakautta. Myös painetermin tarkka ratkaisu vaatii erillisen numeerisen menetelmän, koska paine ei esiinny itsenäisesti missään hallitsevista yhtälöistä vaan se täytyy kytkeä nopeuden muutokseen. Junatunneleita käsittelevissä tutkimuksissa paineen ja nopeuden kytkentään on käytetty esimerkiksi PISO -menetelmää (Cross, 2015), SIMPLE-menetelmää (Colella, 2009) sekä edellisestä johdettua SIMPLER-menetelmää (Kim, J. Y. ja Kim, 2007).

Autodesk CFD 2019 käyttää diffuusio ja lähdetermien ratkaisuun suoraan painotettujen jäännöstermien Galerkin-mallia äärellisten elementtien menetelmästä. Menetelmässä ohjelma määrittelee hallitsevien yhtälöiden termeille painotus ja interpolaatiofunktioiden avulla algebrallisesti ratkaistavan matriisiyhtälön. Ohjelmassa valitaan yksi viidestä erillisestä numeerisesta menetelmästä konvektiivisten termien diskretointiin. Kaikki näistä menetelmistä ovat jonkin kertaluokan ylävirta (eng. upwind) -menetelmiä ja ne soveltuvat kukin erilaisiin laskentatilanteisiin (Autodesk, 2018). Autodesk CFD 2019 käyttää paineen selvittämiseksi SIMPLE-R -algoritmia, jossa aluksi arvataan nopeuskenttä, jonka jälkeen sitä korjataan iteratiivisesti ratkaisemalla paineterminit, kunnes jäännöstermit ovat riittävän pieniä (Autodesk, 2018).

### **3.10 Liikkuvan junan mallinnus**

Junatunnelin virtausmallinnuksen olennainen osa on kuvata jollain tavalla liikkuvan junan vaikutusta virtauskenttään. Liikkuva kiinteä kappale vaikuttaa laskenta-alueen hilaverkkoon, koska jokin laskenta-alueen kohta voi sisältää ajasta riippuen joko fluidia tai kiinteää ainetta. Liikkuvaa kappaletta tukevien menetelmien pääsuuntauksia ovat kiinteän hilan menetelmä (eng. fixed grid method) ja muuttuvan hilan menetelmä (eng. moving grid method). Kiinteän hilan menetelmässä fluidialueen hila ei muutu laskennan aikana vaan kiinteän kappaleen liikkuessa fluidissa kappaleen kopit kommunikoivat niihin kosketuksissa olevien fluidikoppien kanssa. Muuttuvan hilan menetelmissä hilaverkko liikkuu ja muuttuu kappaleen liikkeen mukaisesti niin että koppeja myös poistetaan ja uusia koppeja luodaan, jos ne liikkuvat laskenta-alueen ulkopuolelle (Kim, J. Y. ja Kim, 2007). Junatunneleita koskevissa tutkimuksissa liikkuvan kappaleen mallinnukseen on käytetty kiinteän hilan menetelmiin kuuluvaa tarkan rajapinnan menetelmää (eng. sharp interface method) (Kim, J. Y. ja Kim, 2007; Kim, J. Y. ja Kim, 2009; Juraeva, 2011) ja erilaisia muuttuvan hilan menetelmiä (Yang, 2015; Cross, 2015; Zhang, 2016).

Autodesk CFD 2019 -ohjelmisto käyttää joko muuttuvan hilan menetelmää tai kiinteän hilan menetelmää riippuen siitä missä liikkuva kappale sijaitsee laskennan alussa. Ohjelma luo kopiot kappaleen syrjäyttämistä kopeista, jos kappale mallinnetaan alussa fluidialueen sisälle eli tällöin ohjelma käyttää muuttuvan hilan menetelmää. Ohjelma käyttää kiinteän hila menetelmää, jos liikkuva kappale mallinnetaan alussa fluidialueen

ulkopuolelle, jolloin tarkan rajapinnan menetelmän tavoin kappaleen ollessa fluidin sisällä sen syrjäyttämät kopit peitetään ja peitetyle fluidikopille asetetaan lähimmän kiinteän kappaleen kopin nopeus. Liikkuvalle kappaleelle luodaan oma koordinaattijärjestelmä ja liike määritellään sen mukaisesti. Koordinaattijärjestelmä on järjestetty yhtälön 57 kuvaamalla tavalla (Autodesk, 2018).

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_x(t) & \eta_x(t) & \zeta_x(t) \\ \xi_y(t) & \eta_y(t) & \zeta_y(t) \\ \xi_z(t) & \eta_z(t) & \zeta_z(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi^0 \\ \eta^0 \\ \zeta^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0(t) \\ y_0(t) \\ z_0(t) \end{bmatrix} \quad (57)$$

missä  $x, y$  ja  $z$  ovat globaalit koordinaatit  
 $\xi^0, \eta^0$  ja  $\zeta^0$  ovat liikkuvan kappaleen keskipisteen paikalliset koordinaatit  
 $\xi_x, \xi_y$  ja  $\xi_z$  ovat paikallisen x-akselin komponentit  
 $\eta_x, \eta_y$  ja  $\eta_z$  ovat paikallisen y-akselin komponentit  
 $\zeta_x, \zeta_y$  ja  $\zeta_z$  ovat paikallisen z-akselin komponentit  
 $x_0, y_0$  ja  $z_0$  ovat lokaalin koordinaattijärjestelmän globaali positio

Lineaarisessa liikkeessä, kuten junan liikkuessa pitkin suoraa rataa, kappaleen liikettä voidaan kuvata yksinkertaisesti yhtälön 58 tavalla (Autodesk, 2018).

$$\begin{cases} \Delta x = sU_x \\ \Delta y = sU_y \\ \Delta z = U_z \end{cases} \quad (58)$$

missä  $\Delta x, \Delta y$  ja  $\Delta z$  ovat position muutos paikallisessa koordinaatistossa  
 $s$  on verrannollinen siirtymä  
 $U_x, U_y$  ja  $U_z$  ovat suuntavektoreita.

Liikkuvan kiinteän kappaleen pinnan rajahtona ohjelma käyttää fluidin liukumisen estämistä eli kappaleen saavuttaessa fluidipartikkelin fluidi saa siinä kohtaa saman nopeuden kuin liikkuva kappale (Autodesk, 2018).

### 3.11 Tulosten oikeellisuus

Virtauslaskennan laadun varmistamiseksi laskenta on suoritettava riittävällä tarkkuudella ja tulokset esitettävä niin, että lukija voi arvioida niiden luotettavuuden. Käytännössä virtauslaskenta voidaan jakaa fysikaalista maailmaa kuvaavien mallien valintaan ja näiden mallien ratkaisemista varten valittujen numeeristen menetelmien valintaan (Sørensen ja Nielsen, 2003). Hyvänlaatuisten tulosten saamiseksi virtauslaskijan kannattaa lisäksi tietää yleisimmät tuloksissa esiintyvien virheiden lähteet erityisesti silloin, kun vertailukelpoisia käytännön mittaustuloksia mallinnettavasta tapauksesta ei ole saatavilla.

Kolmiulotteista virtauslaskentaa hyödynnettäessä fysikaalisia ilmiöitä kuvaavien numeeristen mallien oikeellisuus varmistetaan vertailemalla simuloituja tuloksia käytännön kokeista saatuihin tuloksiin. Virtauslaskennasta on olemassa useita vakiintuneita käytännön kokeita, joista on saatu mittauksiin perustuvaa tietoa, jonka avulla voidaan vertailla kuinka hyvin eri numeeriset mallit vastaavat reaali maailmaa (Sørensen ja Nielsen, 2003). On tärkeää, että kokeellisesti mitatut tulokset ovat luotettavasta lähteestä ja hyvätasoisia ettei niissä esiinny kargeita mittausvirheitä. Lisäksi on tärkeää arvioida kuinka hyvin mitattu tieto vastaa omaa tilannetta.

Kokeelliset mittaukset on usein toteutettu mahdollisimman helposti mallinnettavilla järjestelyillä, kun taas käytännön kohteet sen sijaan harvemmin sijaitsevat laboratoriossa ja esimerkiksi virtausta ympäröivä geometria voi olla paljon monimutkaisempi ja virtaukseen voi vaikuttaa useampi fysikaalinen ilmiö kuin kokeellisissa tutkimuksissa. Virtauslaskentatilannetta luodessa on arvioitava kuinka simuloinnissa käytettävät yksinkertaistukset vaikuttavat tuloksiin ja kuvaako mallinnettu tilanne oikeaa tilannetta riittävän tarkasti.

Simulointiparametrien valinnassa on kiinnitettävä huomiota numeerisen mallin ja kokeellisen mallin väliseen rajaehtojen, materiaalien fysikaalisten ominaisuuksien sekä operointitilanteen yhtäpitävyyteen. Lisäksi, jos kokeellinen mittaustieto on peräisin pienoismallikokeesta, täytyy arvioida kuinka hyvin fysikaaliset olosuhteet ja ilmiöt vastaavat täysimittaista tilannetta (Li ja Nielsen, 2011). Validoivassa tutkimuksessa vertaillaan simulointiparametrien vaikutusta tulosten tarkkuuteen kokeilemalla erilaisia koppikokoja, aika-askelien pituuksia, diskreetointimenetelmiä, turbulenssimalleja sekä reunaehdoja. Vertailun perusteella valitaan ne parametrit, jotka johtavat parhaiten mittaustuloksia vastaaviin tuloksiin, jonka jälkeen koekohteessa käytetään vastaavia parametreja.

Koekohdetta mallinnettaessa on siis usein jo valittu esimerkiksi tilanteeseen parhaiten soveltuva turbulenssimalli ja määriteltä todellisuutta hyvin kuvaavat reunaehdot. Fysikaalisten mallien valintaan voidaan hakea apua kirjallisuudesta ja vastaavista tutkimuksista sekä vertailla mallien vaikutusta koekohteesta saatuihin tuloksiin, jos validoivaa tutkimusta ei ole tehty. Lähtökohtana oikeiden fysikaalisten mallien valinnassa on se, että tulokset ovat intuitiivisesti järkeviä. Esimerkiksi jos korkean Reynoldsin luvun virtaus on laminaarista eikä turbulenttia on fysikaaliset mallit valittu todennäköisesti väärin. Usein eri mallit voivat lopulta päätyä samanlaiseen tulokseen, mutta silloin on hyvä tunnistaa mitkä ovat virtaustilanteessa tapahtuvat pääasialliset ilmiöt ja käyttää malleja, joiden tiedetään kuvaavan näitä ilmiöitä parhaiten. Käytännössä esimerkiksi kaikilla turbulenssimalleilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa eivätkä toisaalta mitkään niistä kuvaa turbulenssia täydellisesti. Väärin mallinnettavaa tilannetta kuvaavat mallit voivat johtaa epärealistisiin tuloksiin, mutta teoriassa ainut tapa mallintaa virtaus täydellisesti on DNS-menetelmällä (Kundu ja Cohen, 2008).

Oikeiden yhtälöiden valitsemisen jälkeen valitaan tilanteeseen parhaiten soveltuva yhtälöiden ratkaisumenetelmä ja diskretoidaan reaalitilanne ajallisesti ja spatiaalisesti riittävän tarkasti. Numeeristen menetelmien tarkkuutta kuvataan usein käyttämällä niiden kertaluokkaa eli kuinka montaa viereistä pistettä ne käyttävät jonkun pisteen ratkaisemiseen. Käytännössä tulosten laadun varmistamiseksi tutkimuksissa käytetään vähintään toisen kertaluokan numeerisia menetelmiä aika- ja paikkadifferentiaalien laskemiseen (Sørensen ja Nielsen, 2003). Liian karkean hilaverkon luominen voi aiheuttaa paljon numeerista diffuusiota, joka on tulosten kannalta samanlaista kuin fyysinen viskositeetin aiheuttama diffuusio, mutta syntyy diskreetointivirheen takia. Hilaverkon vaikutus tuloksiin arvioidaan niin, että sitä tihennetään, kunnes tuloksissa ei esiinny enää suuria poikkeamia. Lisäksi seinärajojen läheisyydessä koppien koko valitaan niin, että  $y^+$  arvo on turbulenssimallin vaatimissa rajoissa (Sørensen ja Nielsen, 2003).

Ajassa muuttuvassa tilanteessa aika-askel on lisäksi valittava riittävän pieneksi, jotta fluidipartikkelit eivät matkusta useamman kopin ylitse yhden aika-askeleen aikana. Lähtökohta riittävälle aika-askeleelle määritellään monesti asettamalla ehdoksi yhtälössä 59 esitetylle Courant-Friedrichs-Lewy -numerolle, ettei se saa ylittää arvoa 1, jolloin

aika-askeleen, koppikoon ja fluidin nopeuden suhde varmistaa, että fluidi ei ainakaan ohita mitään koppia kesken aika-askeleen. Tämän jälkeen aika-askelta pienennetään, kunnes tulokset ovat askeleen koosta riippumattomia (Kundu ja Cohen, 2008).

$$CFL = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (59)$$

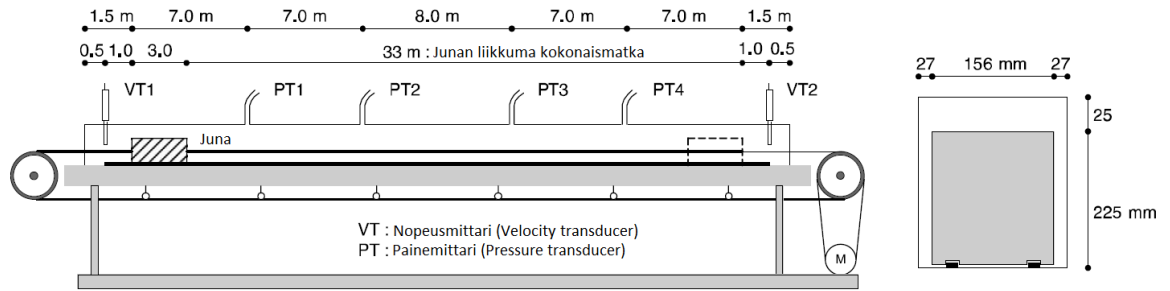
Virtauslaskennan aikana tarkkaillaan taseita kuvaavien yhtälöiden jäännösarvoja eli kuinka paljon jonkin aika-askeleen taseet ovat muuttuneet edellisestä aika-askeleesta. Käytännössä ajassa muuttumattomassa tilanteessa jäännösarvot supistuvat nolleen, kun oikea ratkaisu on saavutettu. Ajassa muuttuvissa tilanteissa pyritään laskennassa jäännösarvot pitämään mahdollisimman pieninä. Jäännösarvoihin on käytännössä mahdollista vaikuttaa lähinnä lisäämällä simuloinnin iterointikertoja. Virtauslaskennan laatua voidaan varmistaa jäännösarvojen avulla vertailemalla tuloksia kahden tilanteen välillä, joista toisessa on pienempi jäännösarvo kuin toisessa (Sørensen ja Nielsen, 2003). Laskennan aikaisiin virheisiin voidaan luokitella myös tietokoneen pyöristysvirhe ja ohjelmointivirheet (Li ja Nielsen, 2011).

## 4 Validointitutkimus

### 4.1 Tutkimuksen kuvaus

Ennen Pisararataan liittyviä simuloiteja suoritetaan validointitutkimus. Tässä työssä junan liikkeen aiheuttamille ilmapirtauksille ja Autodesk CFD -ohjelmiston validointiin käytetään Kim, J. Y. ja Kim, 2007 tutkimuksesta kerättyä tietoa. Kyseisessä tutkimuksessa Kim, J. Y. ja Kim rakensivat realistista tunnelia ja junaa 1:20 kuvaavat pienoismallit ja mittasivat kokeellisesti liikkuvan junan vaikutusta tunnelin paine- ja nopeuskenttiin, jonka jälkeen he mallinsivat saman tilanteen numeerisesti. Samoja kokeellisia mittaustuloksia omien tutkimusten validointiin ovat käyttäneet esimerkiksi Camelli, 2014 ja Cross, 2015. Validointitutkimuksen perusteella arvioidaan Autodesk CFD:n soveltuvuus tunnelisimulointeihin ja tutkitaan minkälaisilla asetuksilla liikkuvan junan simuloinnit ovat vakaita ohjelmistolla. Simuloinnin tilanne pyritään toteuttamaan mahdollisimman samanlaisena kuin Kim, J. Y. ja Kim tutkimuksessa.

Tutkimuksessa kolmen metrin pituinen juna liikkuu 39 metriä pitkää molemmista päästä avointa tunnelia pitkin. Juna aloittaa levosta ja kiihdyttää kiihtyvyydellä  $1 \text{ m/s}^2$  kunnes saavuttaa nopeuden  $3 \text{ m/s}$ , kulkee kahdeksan sekuntia tasaista nopeutta ja lopuksi jarruttaa  $-1 \text{ m/s}^2$  pysähdykseen. Liikkeen kokonaisaika on 14 sekuntia ja mittausten 28 sekuntia. Tunnelissa vallitsevaa painetta mitataan neljästä pisteestä, jotka ovat merkitty kuvassa 18 nimellä PT1, PT2, PT3 ja PT4. Nopeutta mitataan kahdesta pisteestä, jotka ovat merkitty nimellä VT1 ja VT2. Paine- ja nopeusmittarit sijaintineen, tunnelin ja junan geometria sekä junan aloitus- ja lopetuspiste on esitetty kuvassa 18. Molemmille tunnelin suuaukoille asetetaan reunaehdoksi staattinen 0 Pascalin paine, joka merkitsee avointa reunaa ilmakehään.



Kuva 18. Validoinnissa käytetty kokeellinen mittausasetelma, suomennettu (Kim, J. Y. ja Kim, 2007).

Virtauksen Reynoldsin luvuksi Kim, J. Y. ja Kim esittävät  $Re = 49\,004$ . Kyseiseen lukuun päästään, kun vapaan virtauksen huippunopeutena käytetään junan huippunopeutta  $U_{TMAX} = 3,0\text{ m/s}$ , karakterisena mittana käytetään tunnelin korkeutta  $D_h = 250\text{ mm}$  ja ilma oletetaan  $22,6^\circ\text{C}$  lämpöiseksi, jolloin sen dynaaminen viskositeetti Sutherlandin lailla määriteltynä on  $\mu \approx 1,83 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}^2$  ja tiheys ideaalikaasulain mukaan  $\rho \approx 1,194\text{ kg/m}^3$ . Tutkimuksessa mittareiden lukemat on esitetty dimensiottomina arvoina  $u^*$  ja  $C_p$ , jotka on esitetty yhtälöissä 60 ja 61.

$$u^* = \frac{u}{u_{TMAX}} \quad (60)$$

missä  $u$  on paikallinen virtauksen nopeus  $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U_{TMAX}^2} \quad (61)$$

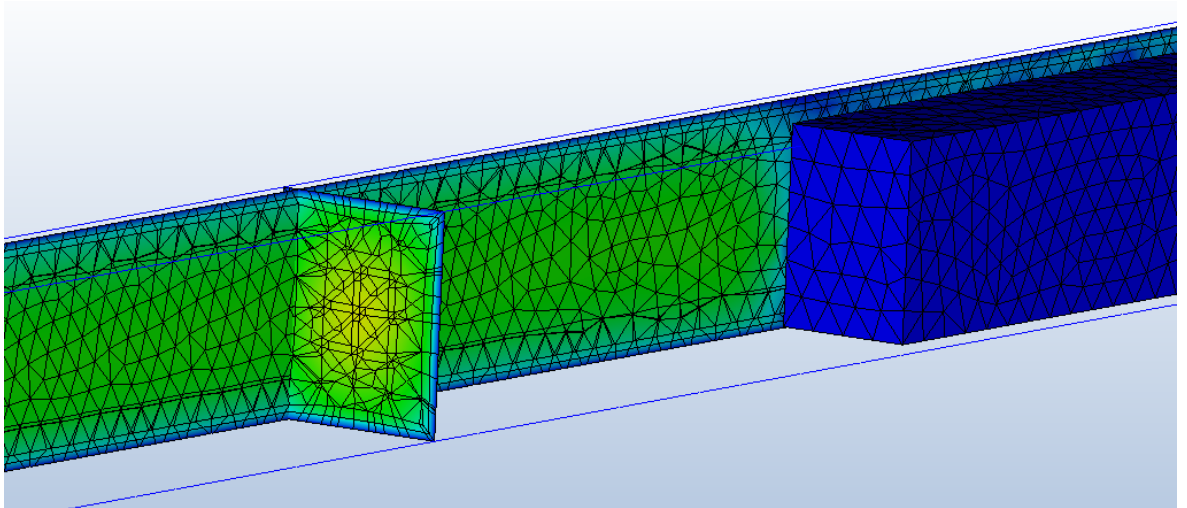
missä  $p$  on paikallinen staattinen paine  $[\text{Pa}]$

## 4.2 Tulokset

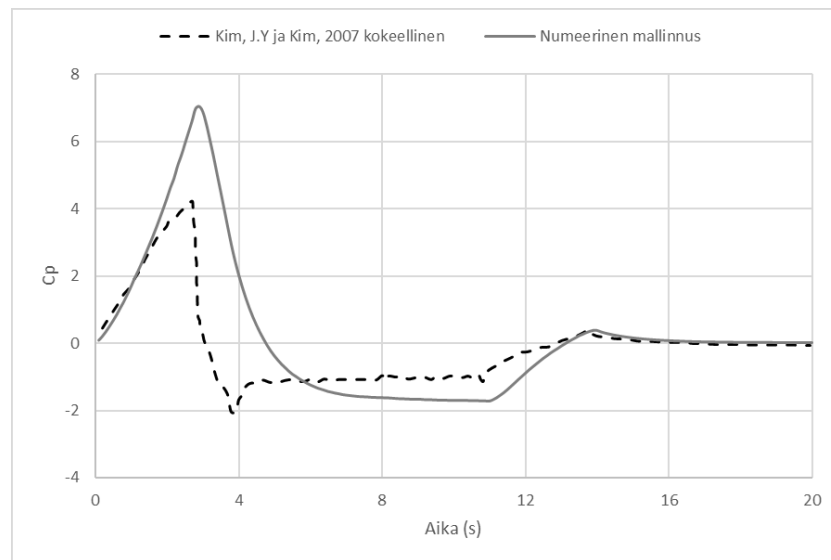
Kuvissa 20, 21, 22, 23, 24 ja 25 on esitetty validointitutkimuksen simuloinneissa saavutetut tulokset ja Kim, J. Y. ja Kim tutkimuksessa esitetyt kokeellisten mittausten arvot. Kuvissa esitetyt arvot ovat simuloinnista, jossa koppikoko on yhdenmukaisesti junalla ja ilmalla 0,04 metriä, aika-askel on 0,01 sekuntia, turbulenssimalli on standardi  $k - \epsilon$  ja ohjelmassa valittava diskreetointimenetelmä advektiivisille termeille on ”ADV 1”, joka suoriutui simuloinneissa kaikista nopeimmin antaen kuitenkin yhtä tarkat tulokset kuin toiset ohjelmassa valittavana olevat menetelmät. Koppien kokonaislukumäärä simuloinnissa oli 556 411 ja aika-askeleita oli 2800. Simuloinnin vakauteen vaikutti merkittävästi seinän rajakerrokseen valittujen kopiien lukumäärä. Koppeja ollessa yli kolme, simuloinnin vakaus kärsi huomattavasti, jonka takia kopiien lukumäärä tunnelin seinällä on pidetty simuloinnissa kahdessa, mutta kuitenkin niin että seinää lähin koppi täyttää vaatimuksen  $30 < y^+ < 300$ . Simuloinneissa käytetty hila tunnelin sisällä on esitetty kuvassa 19.

Tuloksista havaitaan, että Autodesk CFD yliarvioi helposti painekentän suuruuden varsinkin junan kiihdyttäessä ja jarruttaessa. Toisaalta tutkimuksessa esiintyvät fysikaaliset ilmiöt, kuten paineen nouseminen junan kiihdyttäessä, laskeminen nopeuden ollessa vakio sekä taas kasvaminen jarrutuksen aikana ovat kaikki havaittavissa. Nopeuskenttä on samalla tavoin laadullisesti oikea, mutta ei seuraa kokeellisia tuloksia aivan tarkasti. Simulointiin kului aikaa noin 12 tuntia.

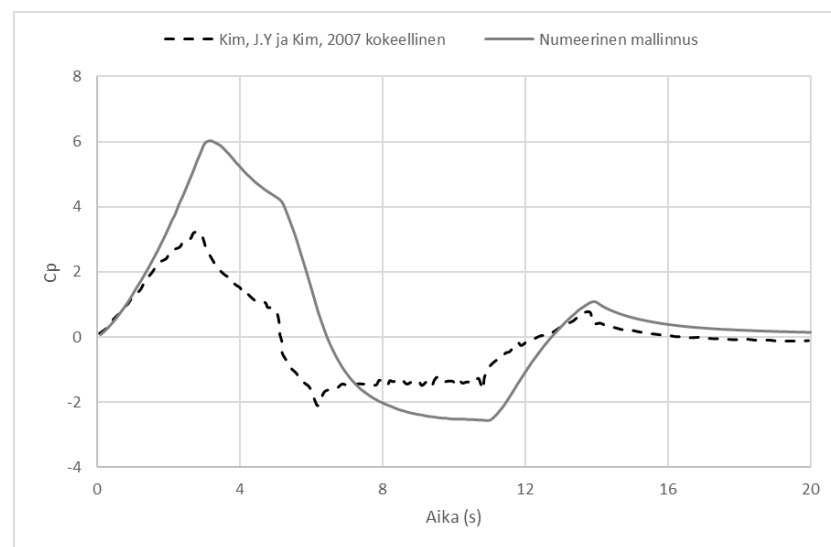




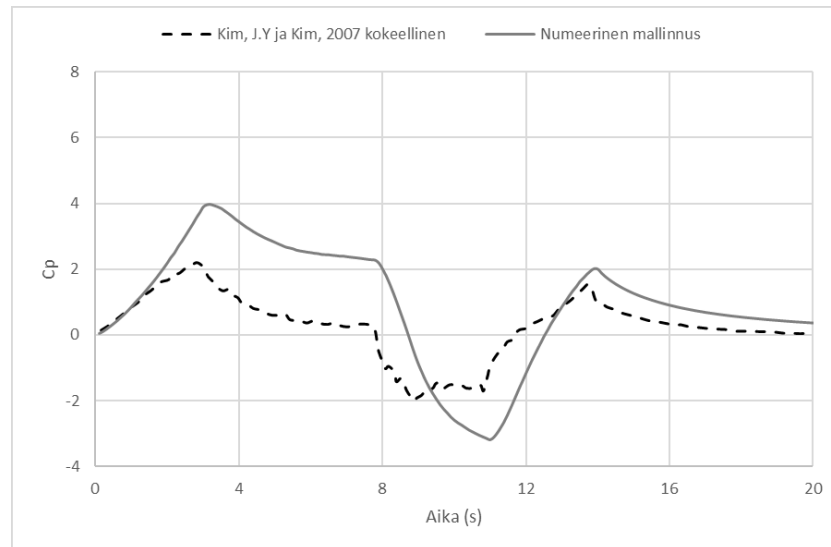
**Kuva 19. Simuloinnissa käytetty junan ja tunnelin hila.**



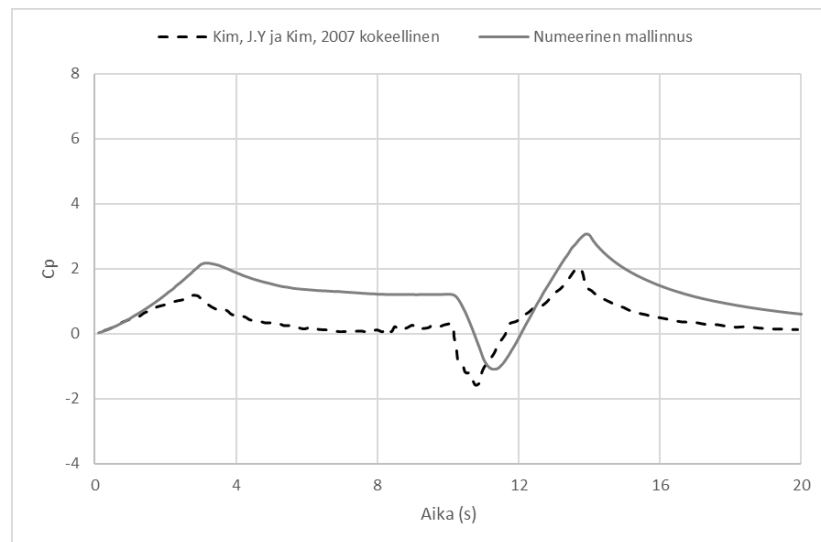
**Kuva 20. Painemittari PT1.**



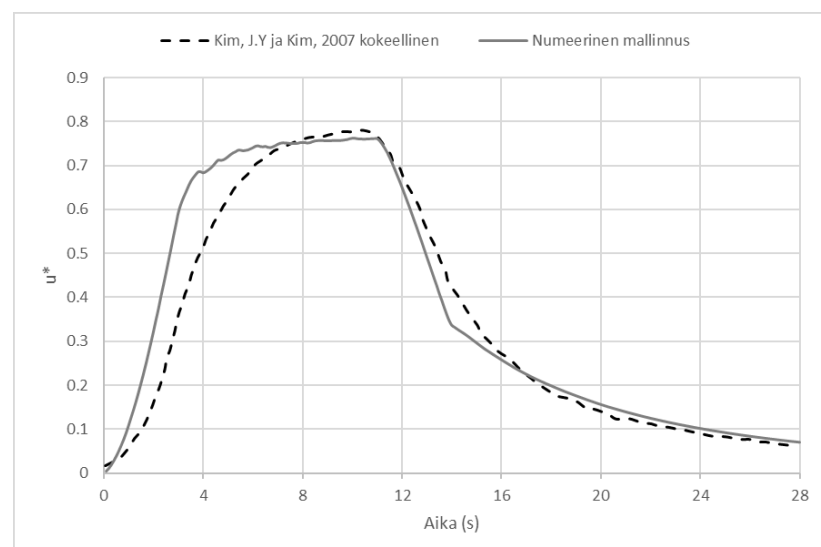
**Kuva 21. Painemittari PT2**



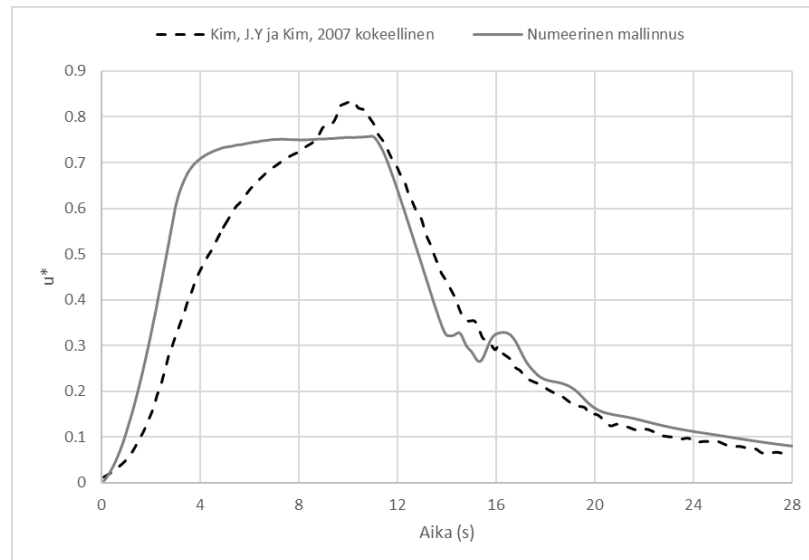
**Kuva 22. Painemittari PT3**



**Kuva 23. Painemittari PT4.**



**Kuva 24. Nopeusmittari VT1.**



Kuva 25. Nopeusmittari VT2.

## 5 Pisararata

### 5.1 Kohteen kuvaus

Pisrarata on Helsinkiin suunnitteilla ollut 7,2 kilometriä pitkä paikallisjunajärjestelmä, joka sisältää kuusi kilometriä ratatunnelia Helsingin kaupungin alapuolella, kolme maanalaista juna-asemaa sekä huolto- ja pelastustunnelin. Maanalaiset asemat sijaitsevat kuvan 26 mukaisesti Töölössä, Helsingin keskustassa sekä Hakaniemessä. Tunnelin suuaukot sijaitsevat Helsingin keskustan ja Pasilan välisen olemassa olevan junaradan molemmin puolin. Hakaniemen asemaa seuraava suuaukko sijaitsee Alppipuiston kohdalla ja Töölön asemaa seuraava suuaukko Eläintarhan kohdalla. Radan tunneliosuus koostuu kahdesta vierekkäisestä tunnelista, joissa paikallisjunat kulkevat vastakkaisiin suuntiin. Sisemmässä ratatunnelissa junat kulkevat reitin Pasila-Töölö-keskusta-Hakaniemi-Pasila ja ulommassa tunnelissa päinvastaisen reitin. Tunnelin suuaukoilla sisä- ja ulkoradan tunnelit yhdistyvät tuplatunneleiksi, joiden pituus on Töölön suuaukolla 45 metriä ja Hakaniemen suuaukolla 14 metriä. Huolto- ja pelastustunneli kulkee ratatunneleiden vierellä ja on yhteydessä maanpintaan kolmen asemien läheisyydessä sijaitsevan ajotunnelin kautta. Jokaisella asemalla on yksi  $10\text{ m}^2$  kokoinen paineentasauskuilu.



Kuva 26. Pisararadan sijainti ja reitti.

## 5.2 Pisararadan tunnelin LVI-tekniset perusratkaisut

Pisararadan junatunnelin ilmanvaihto toteutetaan puolipoikittaisilmanvaihtona. Tunnelissa sijaitseville asemalaitureille tuodaan lämmitettyä tuloilmaa, joka kulkee tunneliin junien mäntäilmiön ja painovoimaisen ilmapvirtauksen vaikutuksesta ja poistuu joko asemien yhteydessä sijaitsevien paineentasauskuilujen tai tunnelin suuaukkojen kautta.

Tunnelissa on ilmanvaihdosta erillinen savunpoisto- ja korvausilmajärjestelmä, joka sisältää laitureiden yhteydessä sijaitsevat savunpoiston imupisteet ja tunnelin varrella säännöllisin välein sijaitsevat taajuusmuuttajilla varustetut impulssipuhaltimet. Järjestelmän kaikki puhaltimet ovat kääntyviä, jolloin jokaista puhallinta on mahdollista käyttää tarvittaessa sekä savunpoistoon että korvausilman siirtämiseen. Tällöin esimerkiksi laitureilla sijaitsevia savunpoiston imupisteitä voidaan tarvittaessa käyttää myös korvausilman tuomiseen. Savunpoiston impulssipuhaltimia ei ole suunniteltu käytettäväksi normaalissa ilmanvaihdossa, mutta huoltotilanteissa puhaltimia on mahdollista hyödyntää ilmanvaihdon tehostamiseen, jos radalla kulkee esimerkiksi dieselkäyttöisiä huoltoajoneuvoja.

Tunnelin palonsammutusjärjestelmä koostuu säännöllisin välein sijoitetuista paloposteista, joille vesi tuodaan Töölön ja Hakaniemen asemien yhteydessä sijaitsevista palovesialtaista pumppaamalla. Ratatunnelien vuoto -ja sammutusvesi kerätään

salaojajärjestelmällä asemien yhteydessä sijaitseviin perusvesialtaisiin, joista vesi pumpataan asemien perusvesialtaisiin ja niiden kautta kunnalliseen viemäriverkostoon. Molemmilla radoilla on tunnelin sisäreunalla salaojajärjestelmän runkolinja ja ulkoreunalla toinen keruuputki, joka yhdistyy runkolinjaan sadan metrin välein. Runkoputkessa on tarkastuskaivoja viidenkymmenen metrin välein, joiden kautta linja on huollettavissa. Tunneleiden perusvesialtaiden varotilavuus on yhden vuorokauden vuotovesivirtaamaan mukainen. Perusvesialtaat sijaitsevat tunnelin matalimmissa kohdissa, jolloin vesi kulkeutuu niihin salaojaputkista painovoimaisesti.

### **5.3 Simulaatioiden lähtötiedot**

Pisaratkan virtaus-, lämpötila- ja paineolosuhteita on tarkasteltu simuloimalla koko tunneliverkosto yksiulotteisesti IDA Tunnel -ohjelmistolla. Ohjelmisto huomioi simuloinnissa ratageometrian ja rakenteiden lämpöominaisuudet, junaliikenteen vaikutuksen virtaukseen ja lämpökuormiin, paikalliset sääolosuhteet sekä LVI-tekniset komponentit, kuten puhaltimet ja säätölaitteet ja muodostaa näiden avulla dynaamisen mallin tunnelin olosuhteista. Mallin avulla on tarkasteltu tunnelin jäätymisriskiä, paineentasauskuilujen mitoittamista sekä hiukkaspitoisuuksia.

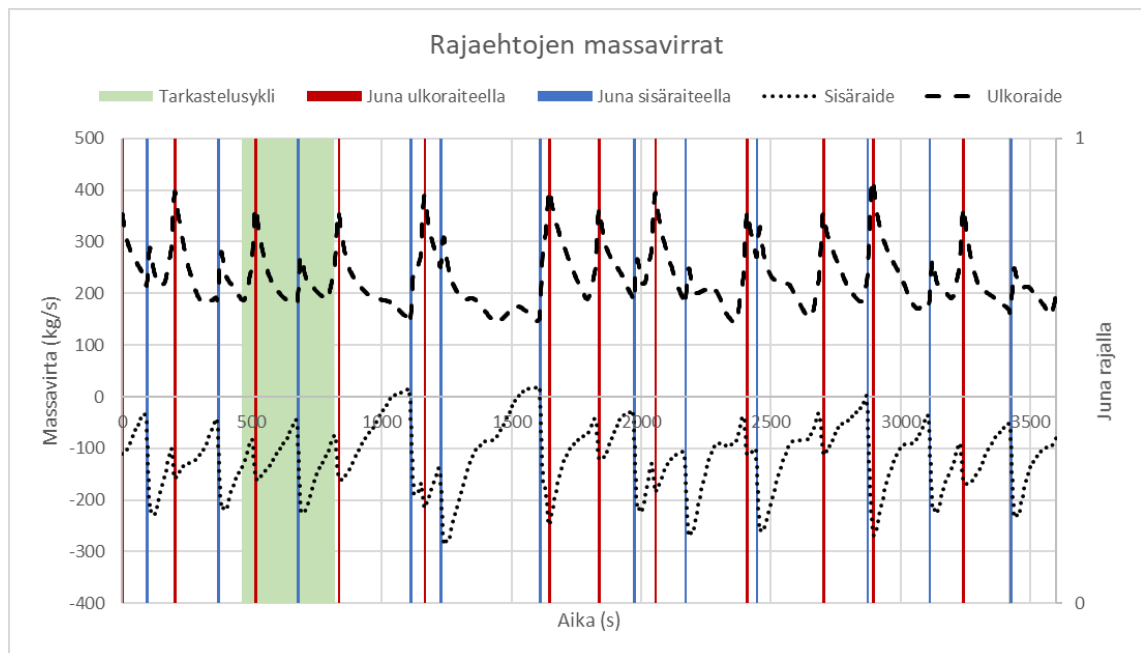
Simulointien tuloksien mukaan tunnelin seinämän lämpötila laskee nolleen eli on vaarassa jäätyä talviaikana molemmilta suuaukoilta kohti ensimmäisiä asemia. Jäätynyt tunneliosuus oli simuloinneissa pidempi Eläntarhan suuaukolta kohti Töölön asemaa. Paineentasauskuilujen parametrit vaikuttivat huomattavasti jäätymiseen. Pienentämällä kuilujen poikkipinta-alaa mahdollisimman pieneksi jäätymisriskissä olevan tunneliosuuden pituus pieneni. Lisäksi asentamalla impulssipuhaltimet tunnelin suuaukolle ja puhaltamalla kohti junan tulosuuntaa junan tuoman pakkasilman määrä pieneni, jolloin myös jäätyneen tunneliosuuden pituus lyheni huomattavasti. Kaikesta huolimatta ratatunneli on vaarassa jäätyä simulointien perusteella Töölön suuaukolta kohti Töölön asemaa noin 1000 metrin matkalta ja Hakaniemen suuaukolta kohti Hakaniemen asemaa noin 600 metrin matkalta. Lisäksi simuloinnit olettavat, että tunneli on ollut toiminnassa useita vuosia, jolloin esimerkiksi ympäröivän kallion lämpötilat ovat tasaantuneet. Tästä oletuksesta johtuen ankarat pakkaset voivat aiheuttaa jäätymistä enemmän kuin mitä ne simuloinneissa näyttävät. Toisaalta ohjelmistolla ei pysty simuloimaan lyhyiden kaksisuuntaisten tuplatunnelien vaikutusta radan olosuhteisiin. Mallissa tuplatunneliosuudet on simuloitu niin, että kaksi tunnelia yhdistyy yhdeksi yhdensuuntaiseksi ja todellista suunnitelmaa pidemmäksi tunneliksi, jonka virtausolosuhteet ohjelma pystyy ennustamaan paremmin.

Tässä tutkimuksessa käytetyt rajaehtojen ajassa muuttuvat arvot ovat peräisin edellä kuvailluista IDA Tunnel -ohjelmistolla tehdyistä simulaatioista. Lähtöarvot ovat tilanteesta, jossa kaikki paineentasauskuilut asemilla ovat täysin auki eikä ilmaa puhalleta impulssipuhaltimilla kohti junia. Kuten edellä mainittiin IDA Tunnelissa ei ole mahdollista mallintaa lyhyttä tuplatunneliosuutta. Sen sijaan kaksoistunneli on mallinnettu yhden radan sisältävänä isompana ja pidempänä tunnelina, jossa junat kulkevat yhtä rataa molempiin suuntiin. Suuremman tunnelin pituus kyseisessä mallissa on 98 metriä. Tunnelin sisäisten rajaehtojen poikkileikkaus sijaitsee taas 108 metriä tunnelin suuaukolta sisälle tunneliin, eli kymmenen metriä suuremman tunnelin jälkeen. Lähtötietojen ajankohta on 14. tammikuuta kello 8-9 aamulla ja tiedot sisältävät kahdesta tunnelin poikkileikkauksesta ja suuaukolta seuraavat parametrit yhden sekunnin aika-askeleella: ilman lämpötila, tunnelin poikkileikkauksen massavirta, staattinen paine sekä tiedon koskettaako juna rajapintaa.

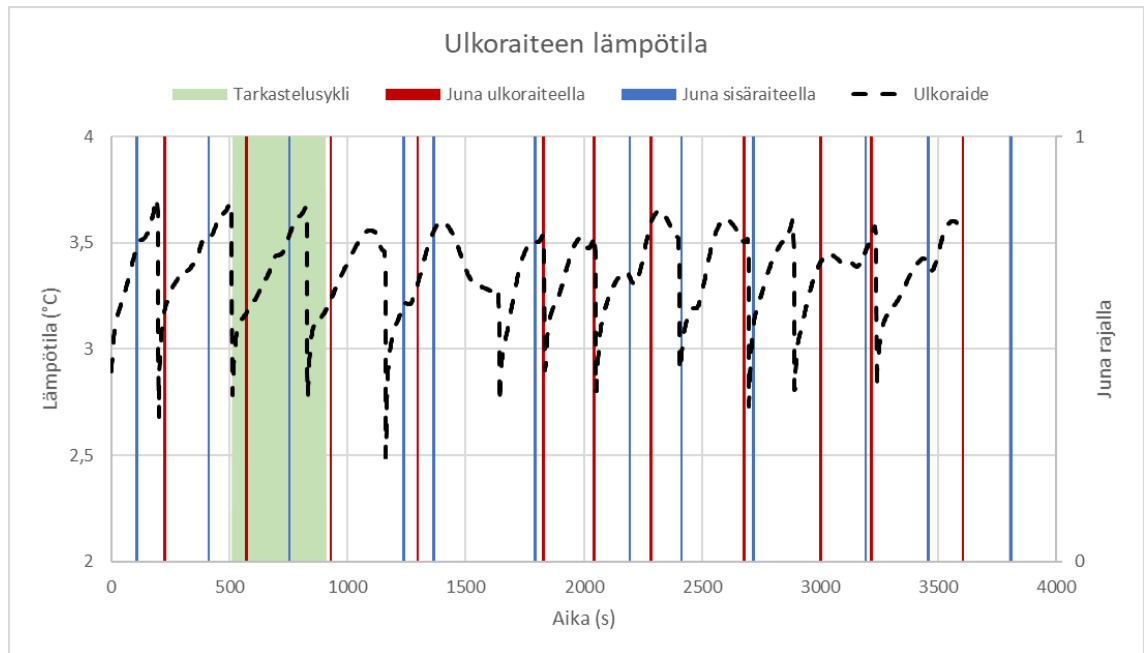
Seuraavissa kuvissa 27 – 31 on IDA Tunnel ohjelmalla tuotetut lähtötiedot. Kuvassa 27 on tunneleiden poikkileikkauksien massavirrat ja ajankohdat, jolloin junat leikkaavat näitä rajapisteitä. Massavirtojen huiput ajoittuvat selvästi junien liikkeiden mukaisesti. Massavirta ulos tunnelista kasvaa, kun juna kulkee ulkoraiteella ulos tunnelista. Vastaavasti kun juna kulkee sisään tunneliin massavirta sisäradalla kohti tunnelia kasvaa. Massavirtojen heilunta seuraa siis vahvasti junien aikataulua ja vaihtelu toistuu syklisesti, koska junat ajavat vuorotellen ulos ja sisään. Kuvassa 28 ulkoraiteen lämpötila pienenee myös syklisesti aina silloin, kun juna ajaa ulos tunnelista. Kuvassa 29 lämpötilan aleneminen on kuitenkin voimakkaampaa sisäradalla silloin, kun juna ajaa sisään tunneliin.

Staatinen paine on määritelty tunneleiden rajapinnoille niin, että ulkoilman vertailupaineeksi on asetettu 0 Pascalia. Kuvassa 30 staatinen paine kasvaa ulkoraiteella junan lähestyessä rajapistettä, mutta junan ohittaessa pisteen se laskee sykäyksen omaisesti. Junan ajaessa sisään tunneliin ulkoradan staatinen paine kasvaa. Kuvassa 32 sisäraiteella paineenkehitys on samankaltainen, mutta toisin kuin ulkoraiteella, juna aiheuttaa paineen kasvamisen junan ohittaessa rajapisteen.

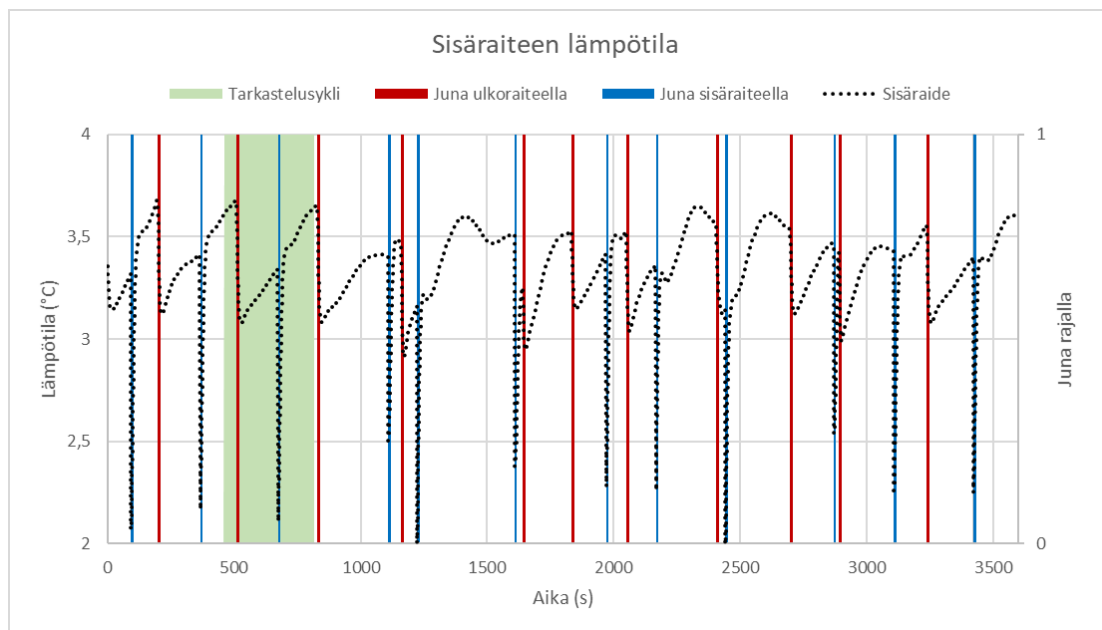
Koska mallin virtaus- ja termodynaamiset parametrit ovat hyvin syklisiä, tässä diplomityössä tarkastellaan vain yhtä kokonaista sykliä ja sen aikana tapahtuvia ilmiöitä. Valitun syklin aikana juna ajaa kerran ulkoradalta ulos tunnelista ja kerran sisään tunneliin sisäradalle. Sykli on merkitty vihreänä alueena kuviin 27 – 31.



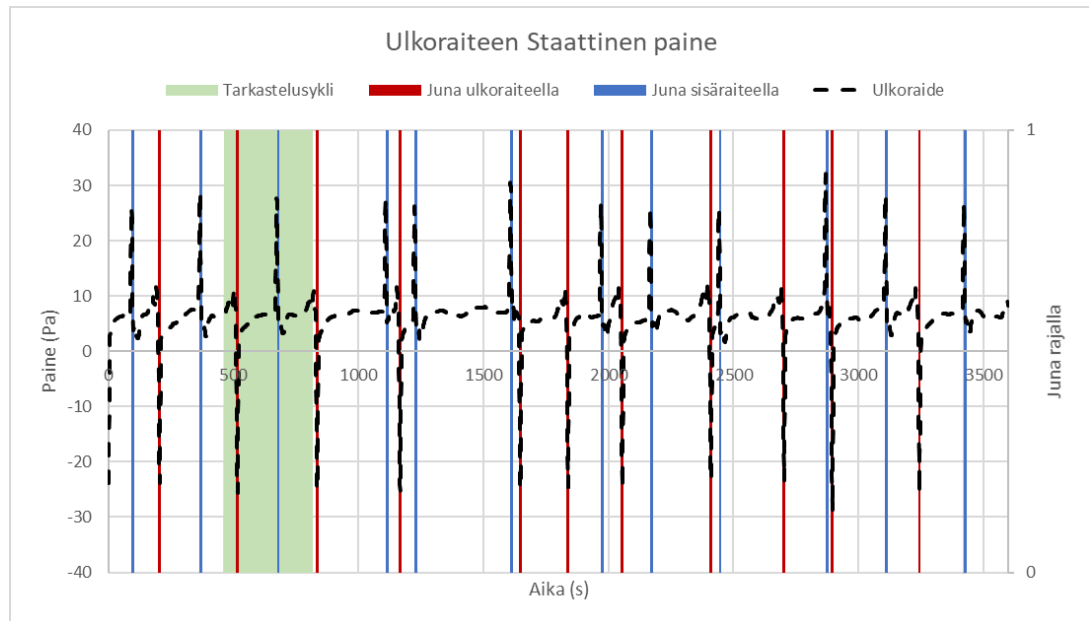
Kuva 27. Sisä- ja ulkoraiteen massavirrat ja junien sijainti.



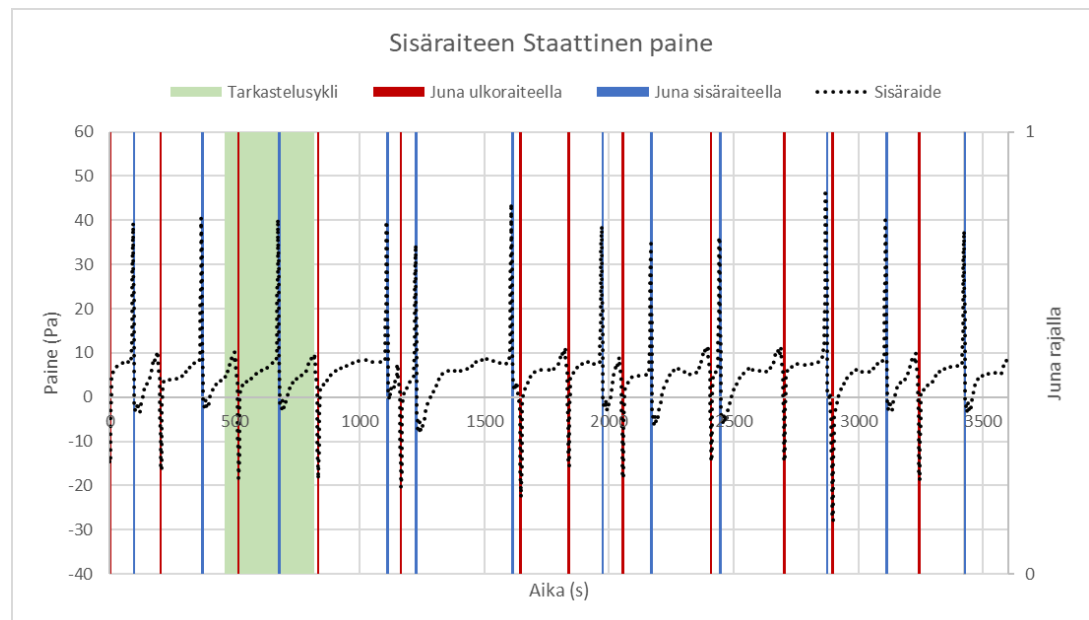
**Kuva 28. Ulkoraiteen lämpötila.**



**Kuva 29. Sisäraiteen lämpötila.**



Kuva 30. Ulkoraiteen staattinen paine.



Kuva 31. Sisäraiteen staattinen paine.

Simulointialueen ja junan geometria on peräisin Pisararadan suunnitteluaineistosta, jonka pohjalta se on yksinkertaistettu. Simuloitavan alueen geometria ja dimensiot on esitetty kuvassa 32. Tuplatunneliosuus rajoittuu simulaatioissa ulkoilmaan. Ulko- ja sisärata sen sijaan jatkuvat tunnelina myös simulaatioalueen jälkeen. Junan maksiminopeus radalla on  $80 \text{ km/h}$  eli noin  $22 \text{ m/s}$ . Korkeusero tunnelin suuaukon ja tunnelin sisäisten rajapintojen välillä on noin 1,1 metriä.





vallitsee korkeusero, mutta tunneli mallinnetaan vaakatasoiseksi simuloinnin yksinkertaistamiseksi. Kaksiulotteisten simulointien jälkeen valitaan parhaiten toimivat reunaehdot ja simulointitilanteet ja simuloidaan ne vielä kolmiulotteisesti.

Laskentahila kaksi- ja kolmiulotteisille simuloinneille luodaan Autodesk CFD:n manuaalisella hilan luontiominaisuudella ja hilariippumattomuutta tutkitaan, jotta simuloinneissa on käytössä niihin kaikista käytännöllisimmin soveltuva hila. Käytännössä hila luodaan niin, että asetetaan yhdelle fluidille tai kiinteälle alueelle haluttu koppikoko ja ohjelma luo sen perusteella koko alueelle hilan. Lisäksi on mahdollista määrittää erillisiä alueita, joissa on pienempi koppikoko. Fluidin ja kiinteän aineen rajapintaan määritetään myös rajakerrosten lukumäärä, kuinka suuri suhteellinen koko laskenta-alueen kopista rajakerros on sekä kuinka paljon rajakerroksen kopit kasvavat liikuttaessa pois päin seinältä. Simuloinneissa hila on luotu asettamalla fluidille yhdenmukainen koppikoko. Tämän jälkeen määritetään tarkennettu alue alueeseen, jonka läpi juna kulkee ja tuplatunnelin alkuun. Junan hilan koppikoko on sama, kuin tarkennetun alueen. Rajakerrosten koppikoko valitaan niin että  $y^+$  arvo on  $35 \leq y^+ \leq 350$ .

Kaksiulotteisen hilan vertailu tehdään simulaatiolla, jossa juna ajaa sisään tunneliin ja rajapintojen oletetaan olevan avoimia ilmaan, eli asetetaan staattinen paine nolnaan. Kolmiulotteisen hilan vertailu tehdään simulaatiolla, jossa rajapinnoille asetetaan lähtötietojen mukaiset massavirrat, mutta liikkuvaa junaa ei ole. Hiloja vertaillaan keskenään tarkastelemalla, kuinka paljon virtausnopeus ja painekenttä muuttuvat sisäradalla valitussa mittauspisteessä. Kuvassa 32 esitetty mittauspiste on 20 metrin päässä sisäradan laskenta-alueen rajasta ja sijaitsee keskellä tunnelin poikkileikkausta.

Simuloinnit alkavat liikkuvan junan sisältävissä simuloinneissa sekuntia ennen kuin juna saapuu laskenta-alueelle ja kestävät vähintään 15 sekuntia, jonka aikana juna kulkee laskenta-alueen läpi kokonaan. Osassa simuloinneista laskentaa jatketaan tämän jälkeen, jolloin simuloinneista selviää mitä virtauskentälle tapahtuu junan ohituksen jälkeen. Ilman liikkuvaa junaa sisältävät simuloinnit ovat kestoaltaan pidempiä ja alkavat jo 50 sekuntia ennen kuin juna saapuisi laskenta-alueelle ja kestävät kokonaisuudessaan korkeintaan 200 sekuntia, jolloin ne sisältävät kokonaisuudessaan yhden lähtötietojen massavirroissa näkyvän syklin, jonka juna aiheuttaa. Simulointien aika-askel valitaan niin, että Courant-Friedrichs-Lewy -luku on alle yksi ja niin että simuloinnit ovat vakaita.

Simuloinnissa ilman ominaisuudet määritellään Autodesk CFD:n valmiin ilma - materiaalin mukaiseksi, jonka viskositeetti asetetaan seuraamaan Sutherlandin lakia. Junalle luodaan oma kiinteä materiaali, jolle määritellään IDA Tunnelin kanssa yhdenmukainen tiheys  $162,3 \text{ kg/m}^3$ .

## 6 Pissararadan simulaatioiden tulokset

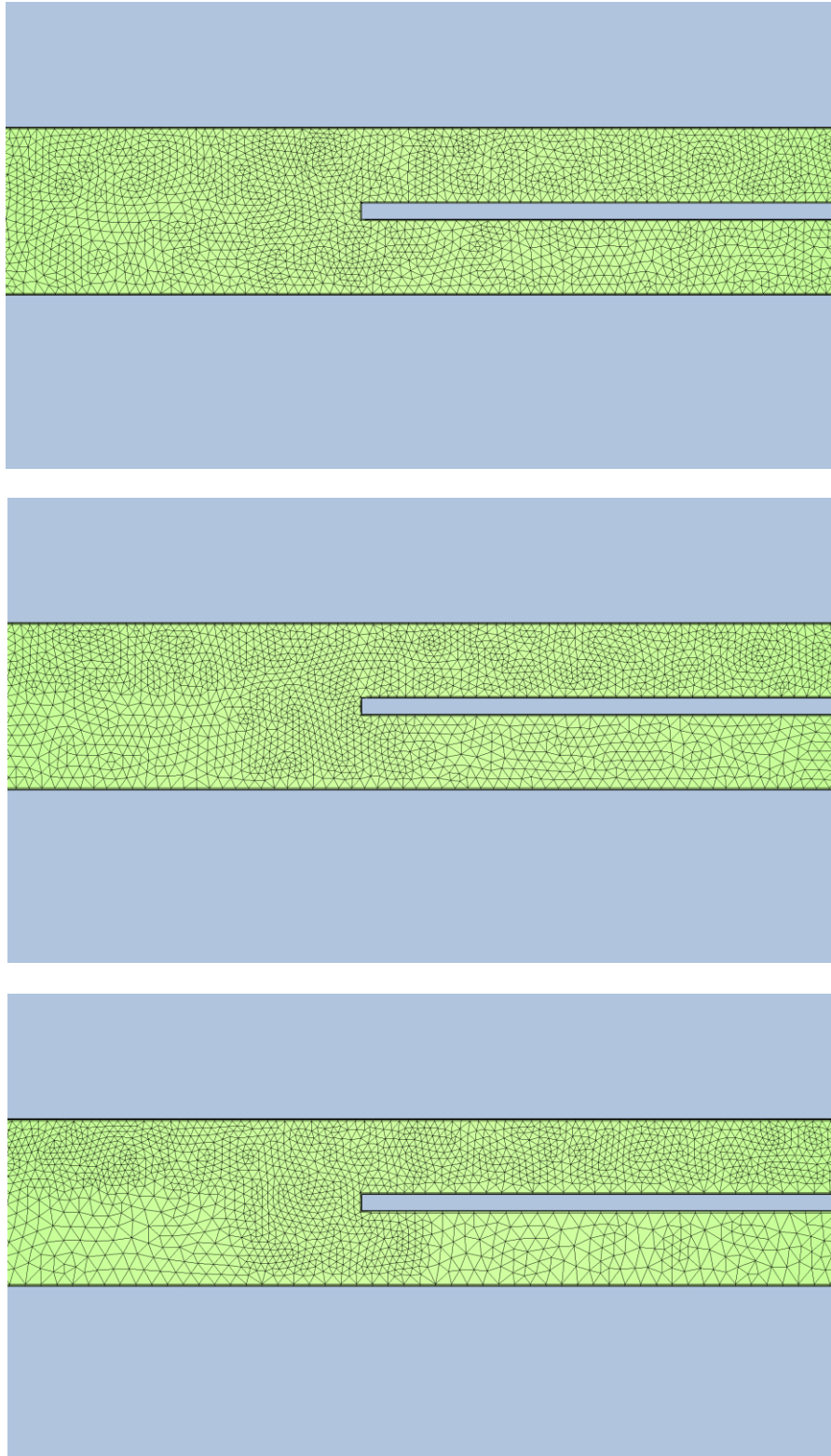
### 6.1 Laskentahila

Hila luodaan kuvassa 32 esitetylle geometrialle kaksiulotteisesti. Kuvassa 33 on kolme eri tarkkuuksista kaksiulotteista hilaa. Karkeimmassa hilassa on 6790 koppia, joista 5753 on ilmaa ja loput kiinteää junaa. Toiseksi tarkimmassa hilassa on 7751 koppia, joista 6373 on ilmaa ja loput kiinteää junaa. Tarkimmassa hilassa on 9928 koppia, joista 7270 on ilmaa ja loput kiinteää junaa. Kuvassa 34 on nopeus- ja painearvot samasta kuvassa 32 esitetyistä mittauspisteistä eli 20 metrin päästä tunnelin sisäradan sisäreunasta. Kaikki mittauspisteiden tulokset ovat käytännössä yhtäpitäviä, vaikkakin tarkimman hilan arvot

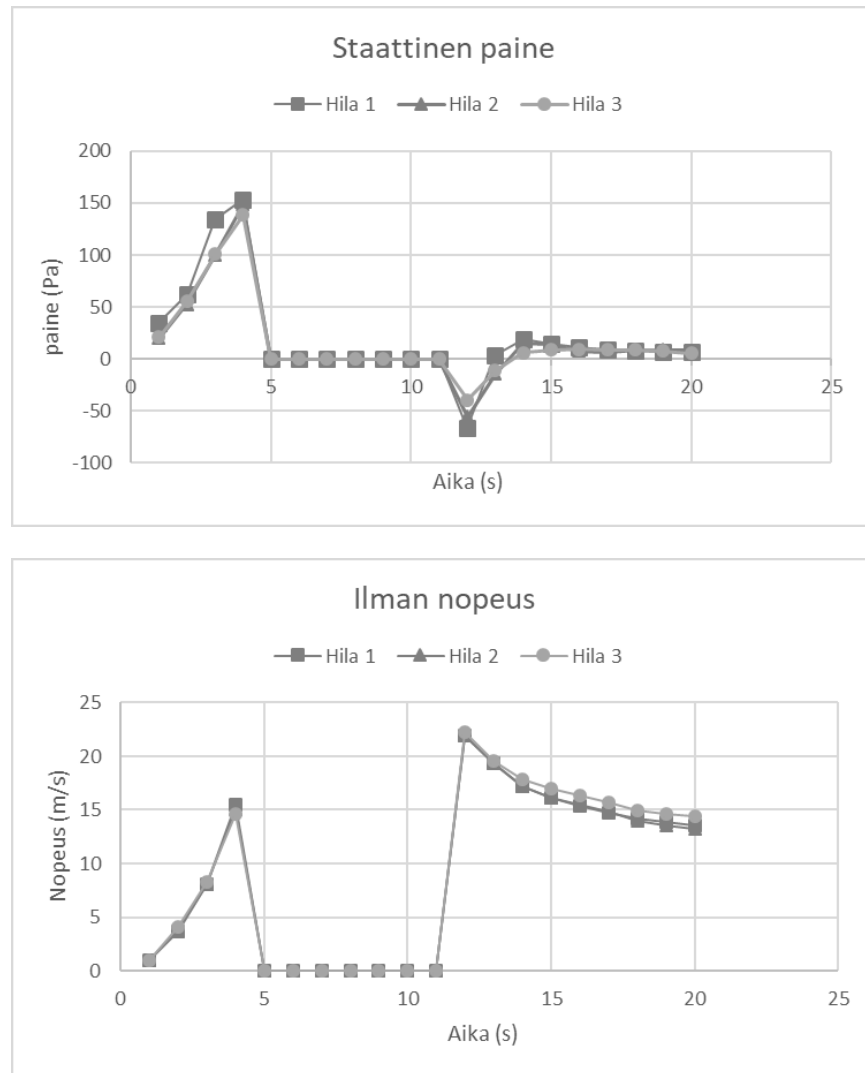
ovat painekentässä alussa hieman poikkeavia. Tarkimman hilan aika-askel oli myös pienempi kuin karkeammissa hiloissa. Karkeammissa hiloissa käytetty aika-askel on 0,01 sekuntia ja tarkimmassa 0,005 sekuntia. Kaikki hilat suoriutuivat laskentatilanteista nopeasti ja olivat vakaita. Laskenta-alueen hilan tarkentaminen tarkimmasta esitetystä hilasta johtaa ohjelmalla huomattavasti epävakampiin simulointeihin liikkuvan junan kanssa, jonka takia ei ole käytännöllistä enää pienentää koppikokoa. Kaksiulotteisia simulointeja varten valitaan tarkin esitelty hila.

Seuraavaksi luodaan kuvan 32 geometria kolmiulotteisesti. Kolmiulotteista vertailua varten käytetään samoja koppikokoja kuin kaksiulotteisissa. Hila sisältää vertailussa vain fluidikoppeja, koska kolmiulotteisessa hilavertailussa ei ole liikkuvaa junaa. Nyt karkein hila sisältää 429 281 koppia, toiseksi tarkin hila 915 709 sekä tarkin hila 1 154 011 koppia. Hilat tarkimmasta karkeimpaan on leikkauksena kuvassa 35. Simuloinneissa junan reittiä ei ole tarkennettu tässä hilassa, koska liikkuvaa junaa ei ole. Kuvassa 36 on virtauksen nopeus ja staattinen paine samassa mittauspisteessä kuin edellä eli 20 metrin päässä tunnelin sisäradan sisäreunalta. Kaikilla hiloilla painetasot pysyvät samoina mutta karkeimmalla hilalla virtauksen nopeus yliarvioituu hetken aikaa. Toisaalta tarkempien hilojen simulointiaika on huomattavasti pidempi kuin karkeimmalla hilalla ja tarkin hila johtaa usein myös epävakaisiin simulointeihin. Kolmiulotteisiin simulointeihin valitaan karkein esitelty hila, koska vertailutulokset ovat riittävän lähellä muita hiloja ja simulointiajat ovat huomattavasti lyhyempiä. Simuloinneissa, joissa lisätään liikkuva juna ja sen reitille tarkennettu alue koppien määräksi valitulla hilalla muodostuu yhteensä 500 866, joista 469 834 on ilmaa ja 31 032 kiinteitä koppeja. Lopullinen junan ja tunnelin hila on esitetty kuvassa 37.

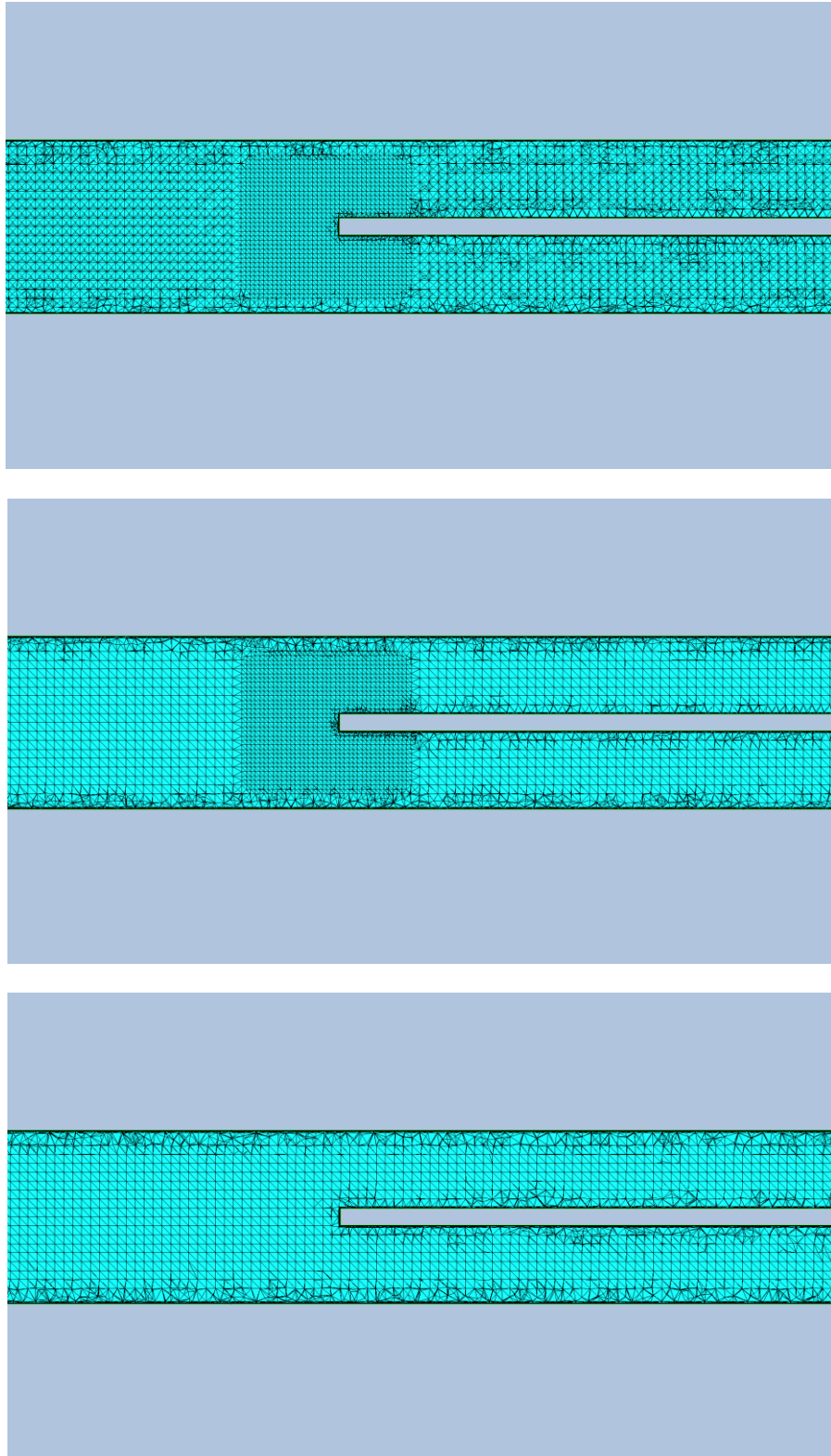
Rajakerroksen hila määritellään niin, että koppikoon muutos seinää lähimmästä kopista kaukaisimpaan ja siirtyminen normaaliin fluidialueen koppikokoon on tasainen. Simuloinneissa rajakerroksen kopit on pakko määritellä kolmion muotoisiksi elementeiksi, jotta simuloinnit toimivat. Rajakerroksen määrittelyssä nousee ohjelmalla keskeiseksi haaste luoda rajakerros, joka täyttää y+-arvolle asetetut vaatimukset ja on sen lisäksi vakaa simuloinneissa. Kuvassa 38 on kolmiulotteisissa simuloinneissa käytetty rajakerros ja kerroksen viereinen hila.



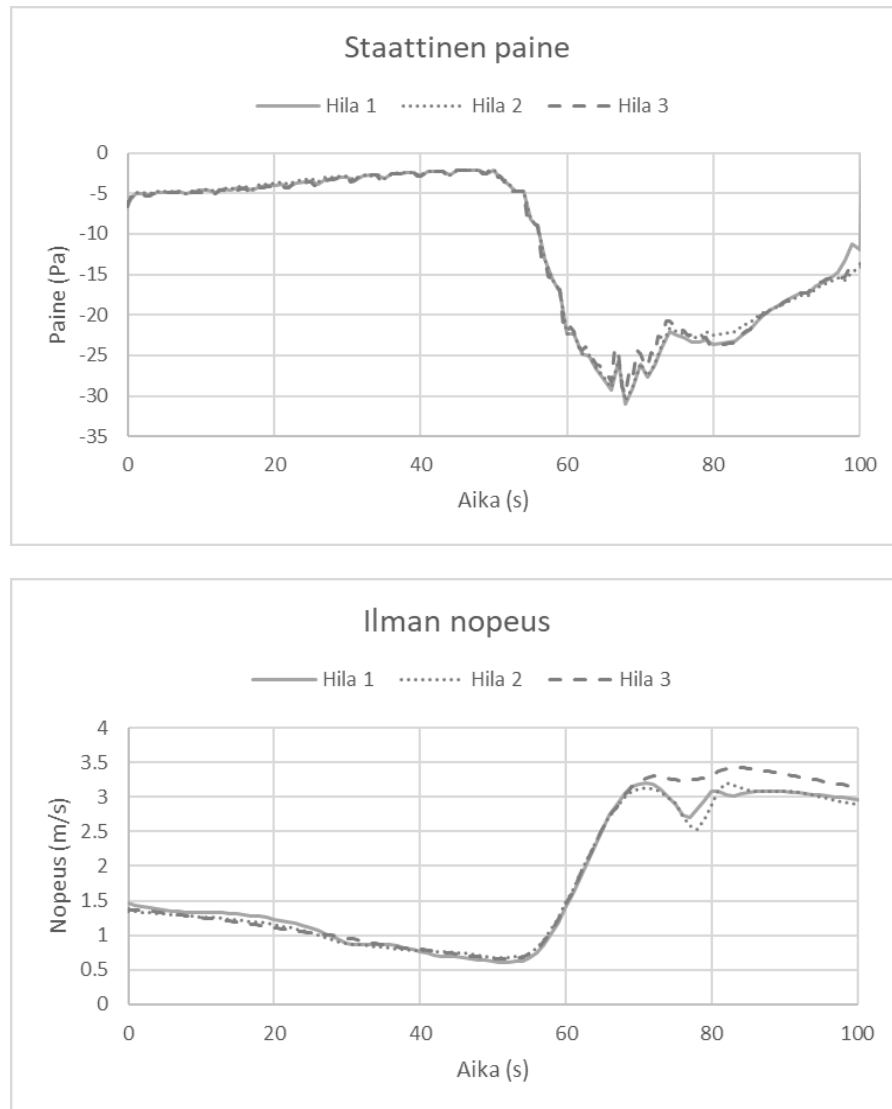
**Kuva 33. Kaksiulotteisessa hilavertailussa käytetyt hilat tarkimmasta (ylhällä) karkeimpaan (alhaalla).**



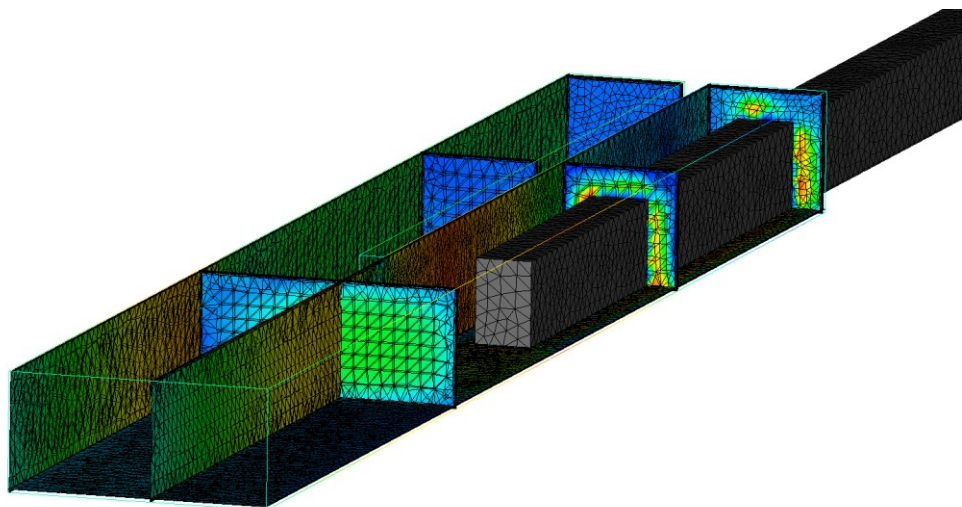
**Kuva 34. Ilman staattinen paine ja nopeus 20 metriä sisäradan reunalta kaksikulotteisessa hilavertailussa.**



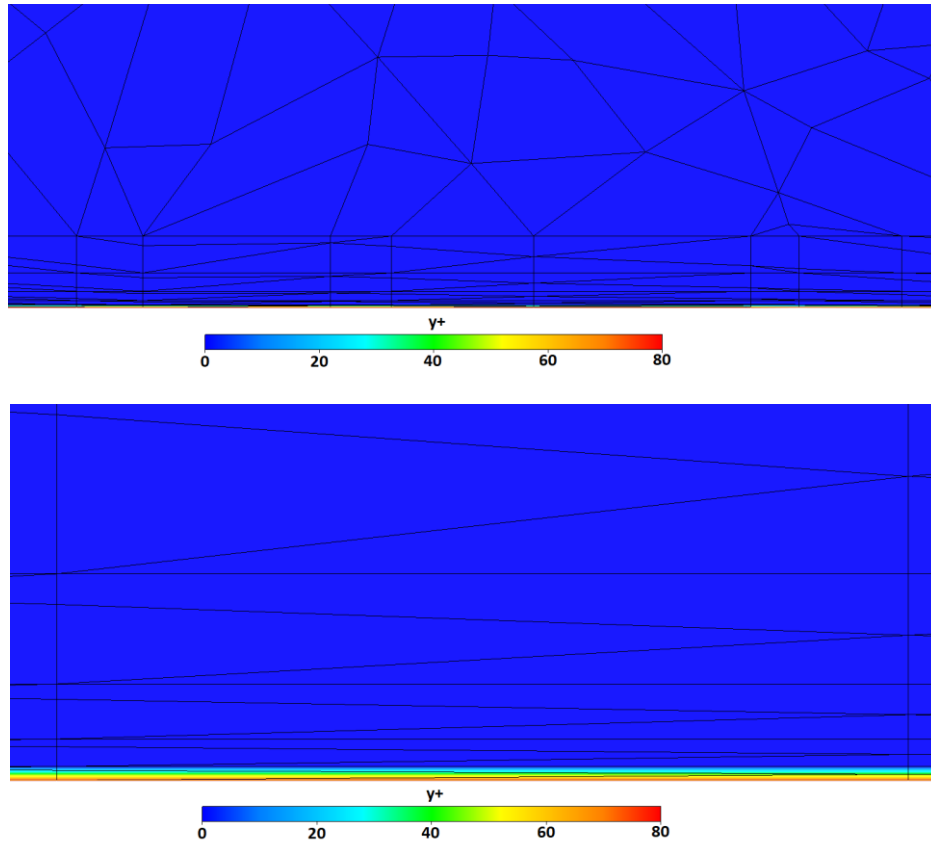
**Kuva 35. Kolmiulotteisessa hilavertailussa käytetyt hilat tarkimmasta (ylhäällä) karkeimpaan (alhaalla).**



Kuva 36. Ilman staattinen paine ja nopeus 20 metriä sisäradan reunalta kolmiulotteisessa hilavertailussa.



Kuva 37. Laskenta-alueen hila.



Kuva 38. (Ylhäällä) Rajakerroksen lähialueen ja (Alhaalla) rajakerroksen hilan  $y^+$ -arvo.

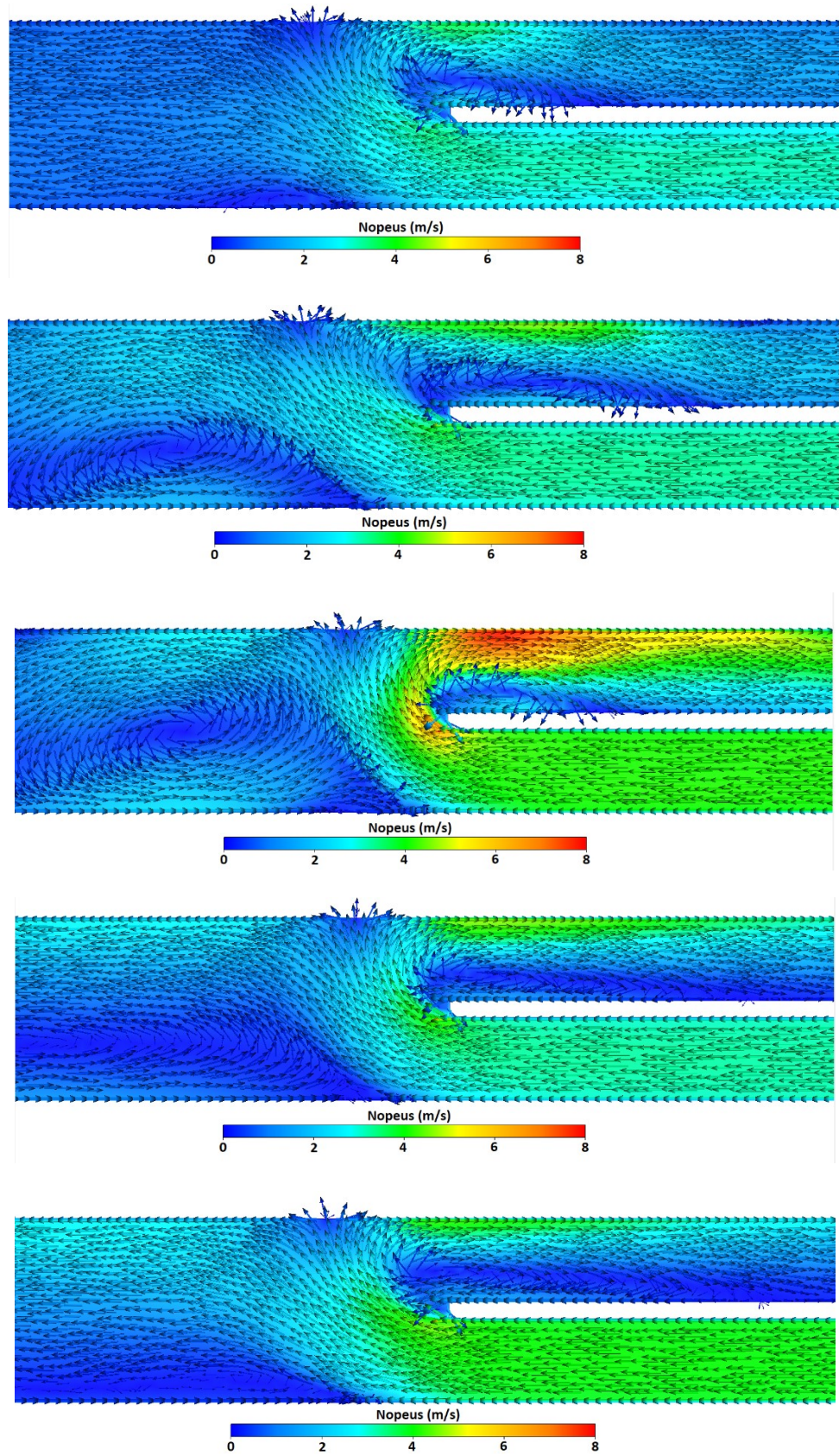
## 6.2 Kaksiulotteiset simulaatiot

Ensimmäisessä simulaatiossa ei käytetä liikkuvaa junaa. Reunaehdoiksi asetetaan lähtötiedoissa kuvassa 27 esitetyt massavirrat, jotka on muunnettu nopeusreunaehdoiksi molempien ratojen reunoille. Lisäksi asetetaan ulkoradalle kuvan 28 mukainen lämpötilareunaehto. Reunaehdoille käytetään 200 sekunnin pituista osuutta koko syklistä, jossa lähtötiedoissa juna ajaa sisään tunnelin suuaukosta ja suuntaa sisäradalle 50 sekunnin kohdalla. Tuloksissa tarkastellaan, että havaitaanko sisään ajaminen virtauskentästä ilman että junaa on mallinnettu.

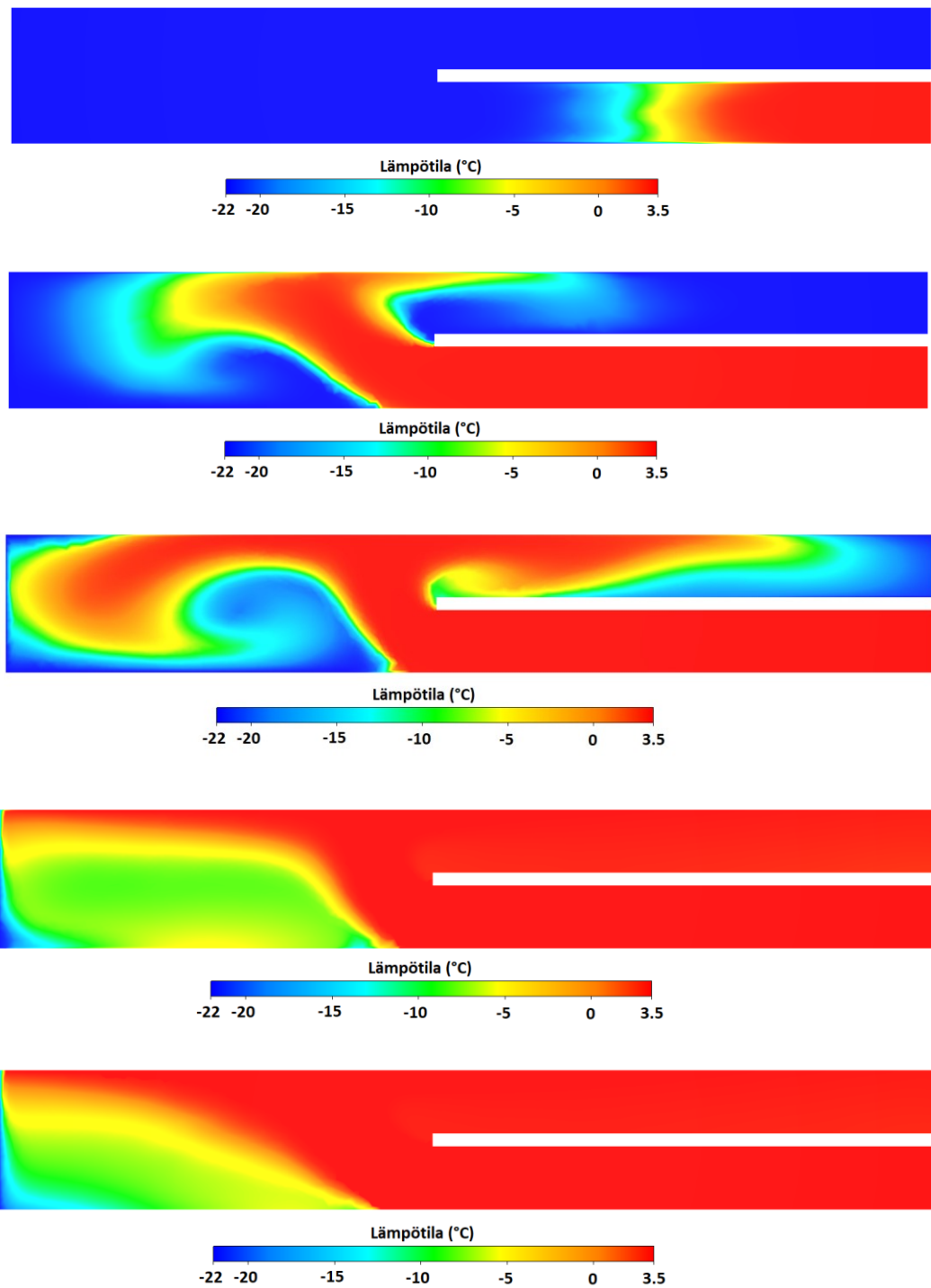
Kuvissa 39 ja 40 on simulaatioalueen nopeuskentän ja lämpötilan kehittyminen edellä kuvaillussa tilanteessa. Kuvassa 39 virtausnopeus sisäradalla on kasvanut 60 ja 80 sekunnin ajanhetkillä ja taas laskenut myöhemmissä tilanteissa. Virtausnopeuden kasvu aiheuttaa myös pyörteilyä tuplatunneliosuudelle. Nopeuskentän suuntavektoriesityksen perusteella ilma vaikuttaa kiertävän ulkoradalta sisäradalle koko simulaation ajan. Simulaation alku- ja lopputilanne ovat lisäksi ulkoradalla kiihtynyttä nopeutta lukuun ottamatta samanlaisia.

Kuvan 40 lämpötilakentän perusteella sisäradan ilma on käytännössä peräisin lähes kokonaan ulkoradalta. Kuvassa muodostuu samankaltainen pyörre tuplatunnelin sisälle kuin nopeuskentässä ja simulaation loppupuolella tuplatunnelin poikki on syntynyt kalteva lämpötilan rajakerros. Rajakerroksen muoto osoittaa nopeuskentän suuntavektoriesityksen tapaisesti, että ulkoradalta tuleva ilma kaartuu kohti sisärataa.





Kuva 39. Ilman nopeus ja suuntavektoriesitys ajankohtina  $t = \{20, 60, 80, 180, 200\}$  s (Ylhäältä alas).



Kuva 40. Ilman lämpötila ajankohtina  $t = \{20, 60, 80, 180, 200\}$  s (Ylhäältä alas).

Seuraavassa simulaatiossa tarkastellaan toista 200 sekunnin pituista osuutta kuvassa 27 esitetystä syklistä, jossa juna ajaisi lähtötietojen perusteella ulos tunnelista ulkoradan kautta 50 sekunnin kohdalla. Liikkuvaa junaa ei kuitenkaan vielä kukaan mallinnettu. Sen sijaan muutetaan pelkästään reunaehdoista käytetty ajanhetki. Kuvissa 41 ja 42 on jälleen esitetty nopeus ja lämpötilakentät.

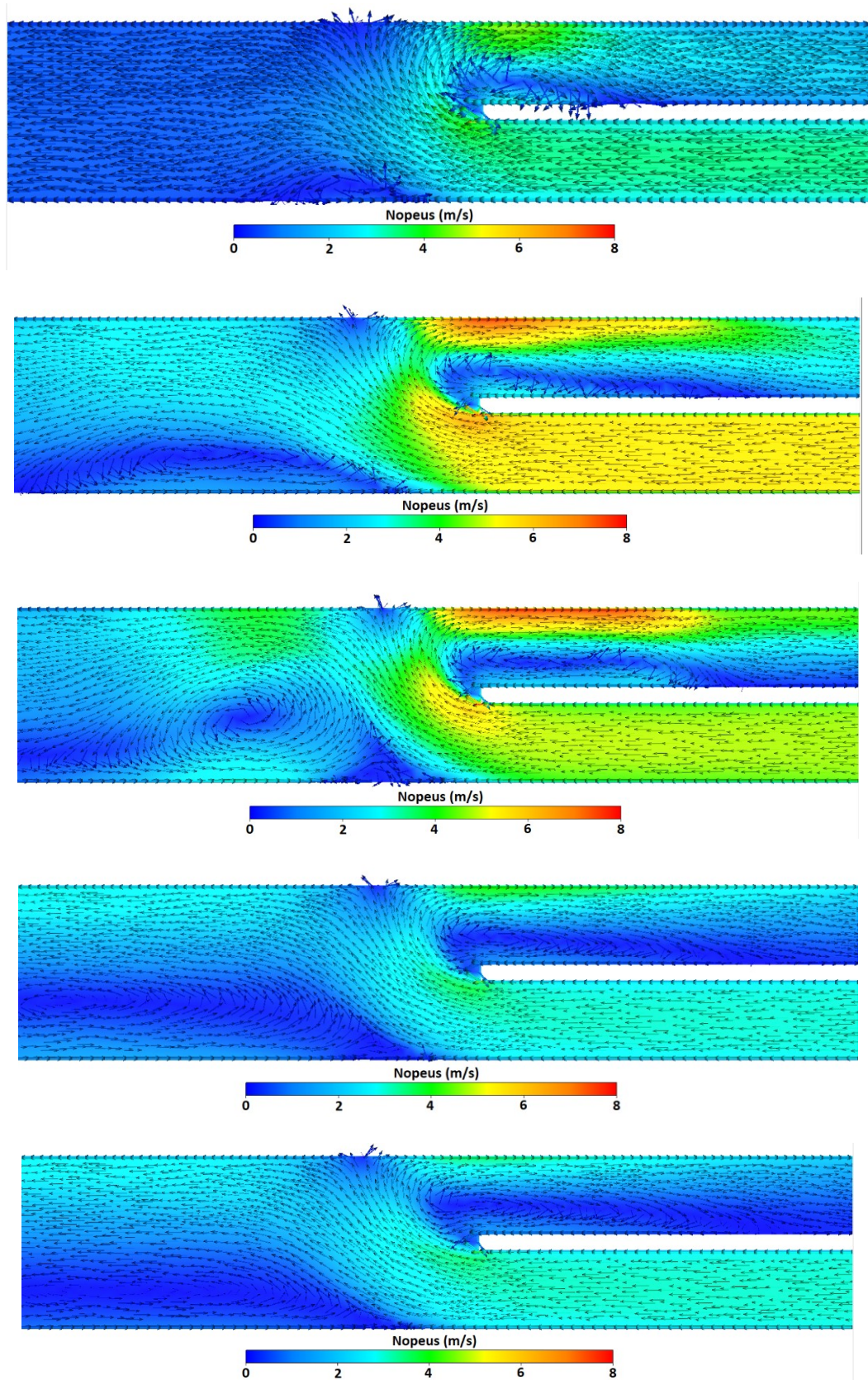
Käytännössä nopeuskenttä vaikuttaa muuttuvan ainoastaan niin, että ulkoradan virtausnopeus kasvaa sisäradan nopeuden lisäksi. Virtaus kääntyy silti sisäradan suuntaan ja tuplaradalle syntyy samanlaista pyörteilyä kuin aikaisemmin. Lämpötilakentän kehittyminen on yhtä lailla edellisen simulaatiotilanteen mukainen. Virtauskentässä havaitaan siis virtauksen kiihtymistä ja pyörteilyä sen ajanhetken jälkeen, jolloin juna lähtötietojen mukaan ajaa simuloitun alueen läpi, vaikka itse junaa ei ole mallinnettu kaksikulotteiseen simulointiin.

Pelkillä nopeusrajaehdoilla simulaatiot ovat vakaita. Simulointien alussa syntyy kuitenkin huomattava paineaalto, vaikka ohjelmassa määriteltäisiin rajapinnoille alkuarvo, jonka avulla se määrittää virtauskentän simulaation alkuhetkelle. Paineaaltoa ei synny, jos simulaatiota ajetaan ensin ajassa muuttumattomana niin, että laskenta-alueen nopeuskenttä on kehittynyt alkuarvojen mukaisiksi ja sen jälkeen siirrytään ajassa muuttuviin simulaatioihin.

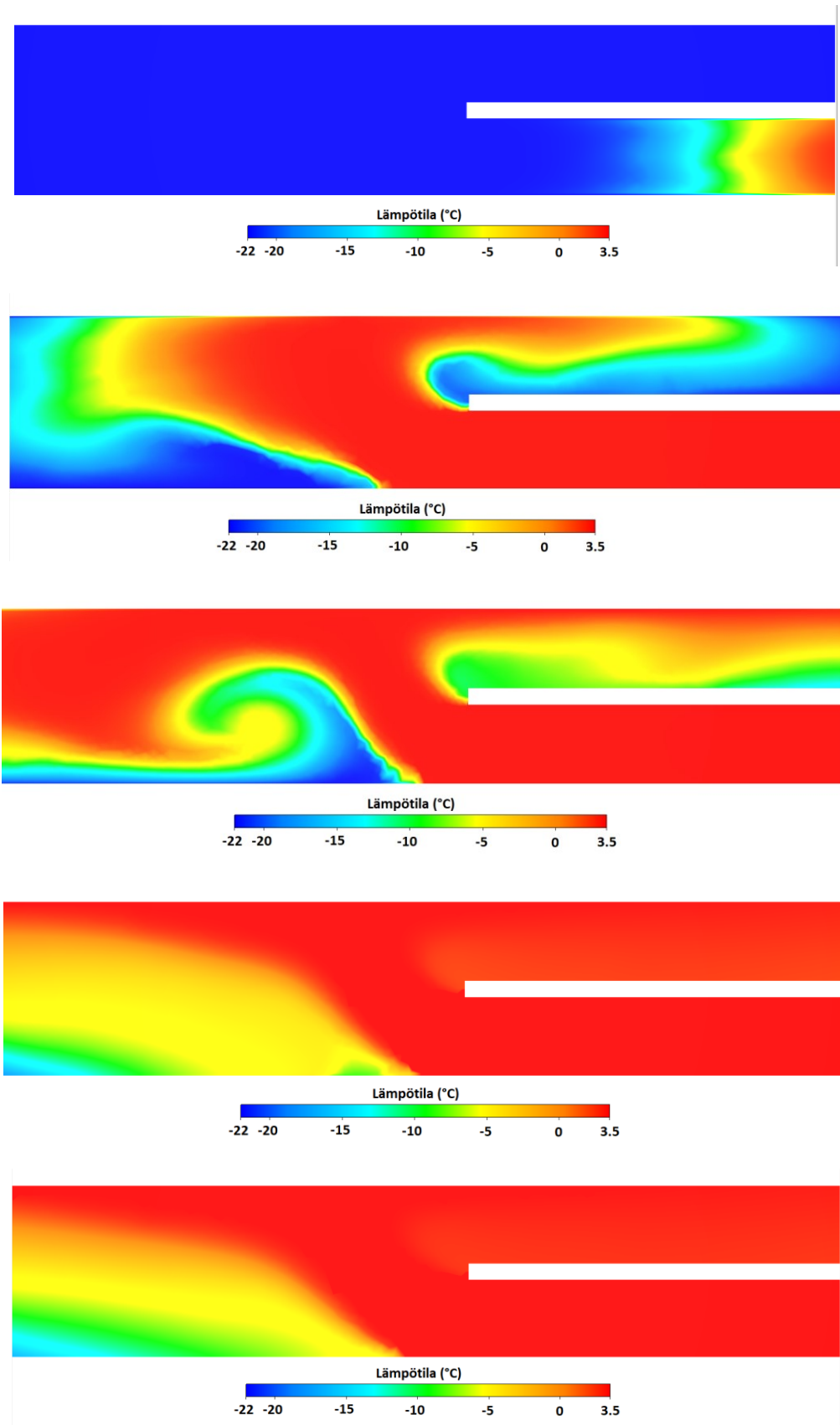
Autodesk CFD:ssä on ominaisuus, jossa reunaehdoksi asetetun nopeuden voi asettaa täysin kehittyneeksi, jolloin reunalle muodostuu nopeusgradientti. Ajassa muuttuvissa simulaatioissa tätä ominaisuutta ei ole kuitenkaan mahdollista käyttää. Reunalle asetettu vakionopeusehto on tällöin voimassa koko reunan pinta-alalla, vaikka oikeasti kohdassa vallitsisi nopeusjakauma. Kyseisestä syystä  $y^+$  arvot saattoivat olla välittömässä reunan läheisyydessä isompia, kuin sallittu arvo  $30 < y^+ < 300$ .

Nopeusrajaehdoilla ilman kiertäminen tapahtuu heti tuplatunnelin alussa. Kyseisillä reunaehdoilla kiertämisilmiön voimakkuus pysyy, vaikka tuplatunnelia lyhennettäisiin huomattavasti kuvan 32 dimensioista. Kuvissa 43 ja 44 on nopeuden suuntavektoriesitys ja lämpötilajakauma tilanteesta, jossa tunnelin kokonaispituus on sama, mutta tuplatunneliosuuden pituus on vain kymmenen metriä. Simuloitavan syklin lopussa lämpötila on levittänyt sisäradalle samaan tapaan kuin aikaisemmissa simuloinneissa.



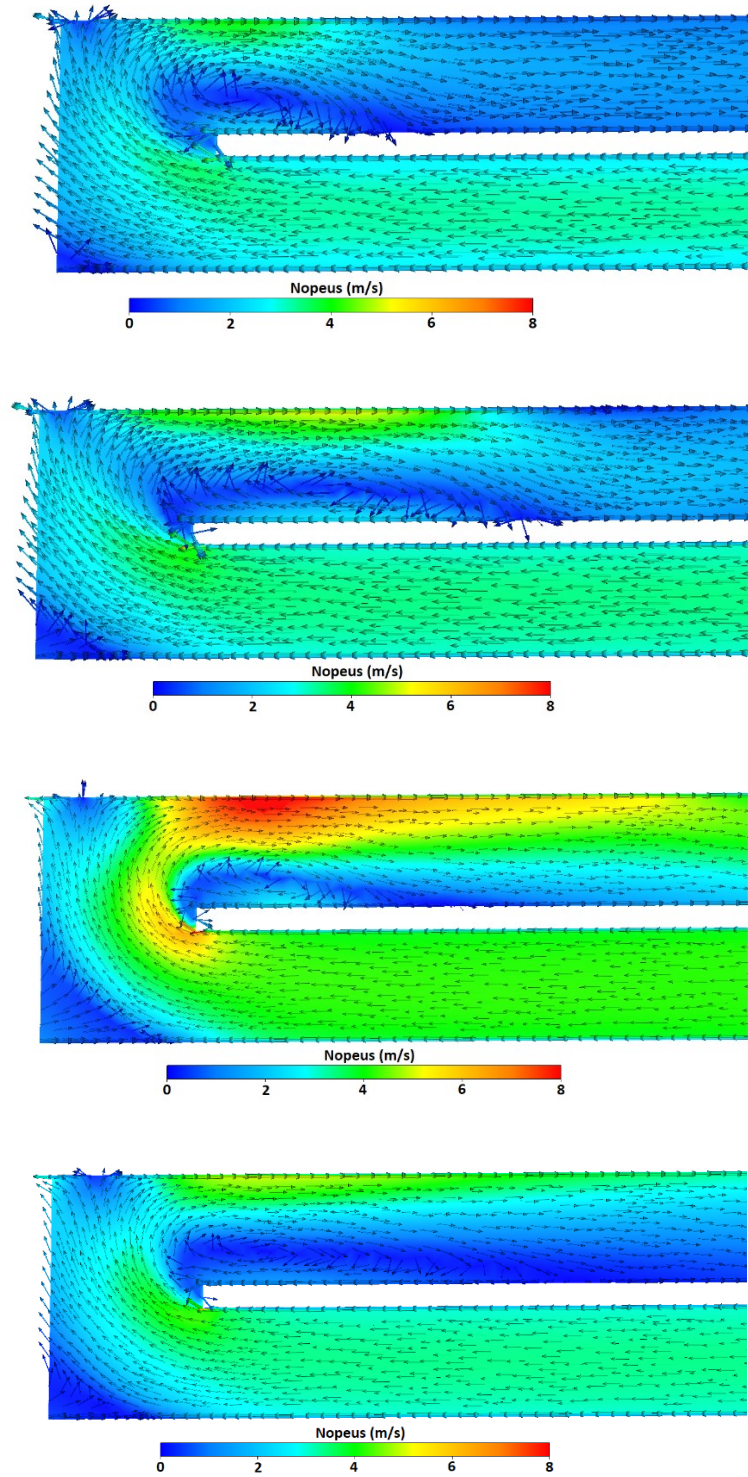


Kuva 41. Ilman nopeus ja suuntavektoriesitys ajankohtina  $t = \{20, 60, 80, 180, 200\}$  s (Ylhäältä alas).

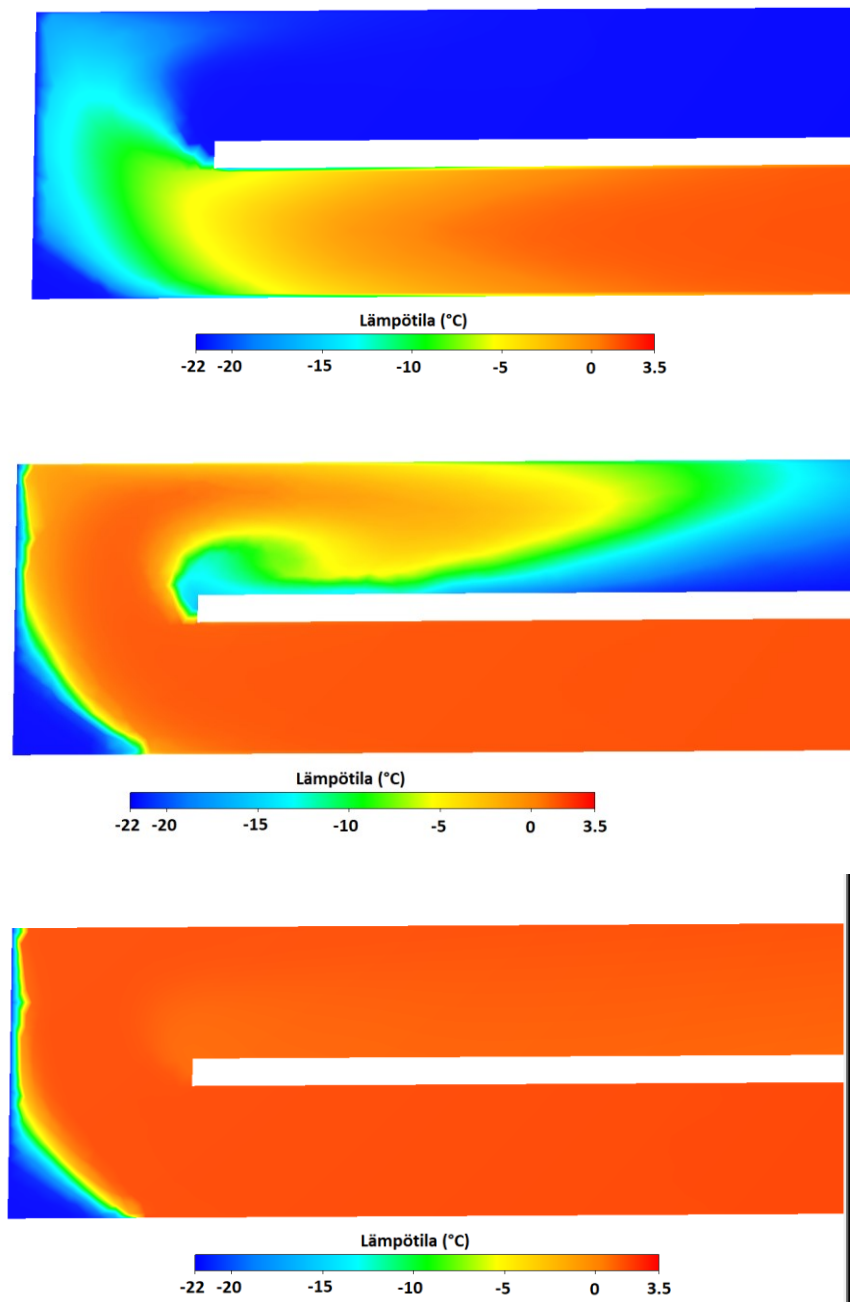


Kuva 42. Ilman lämpötila ajankohtina  $t = \{20, 60, 80, 180, 200\}$  s (Ylhäältä alas).





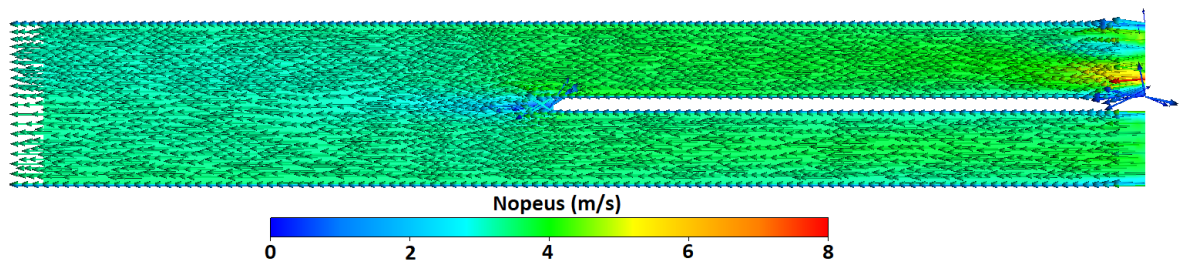
Kuva 43. Pienempi tuplatunneli ja nopeusrajaehdot. Suuntavektorit ajanhetkellä  $t = \{20, 60, 80, 180\}$  s.



Kuva 44. Pienempi tuplatunneli ja nopeusrajaehdot. Lämpötilat ajanhetkellä  $t = \{60, 80, 180\}$  s.

Tarkastellaan painereunaehtojen hyödyntämistä tunnelin virtauskentän selvittämisessä. Kuvissa 30 ja 31 esitettiin painetasot sisä- ja ulkoradan reunoilla. Molemmissa kuvissa paine on lyhyitä piikkejä luukuun ottamatta positiivinen koko syklin ajan. Lähtötietojen mukaan sisäradalla paine siis kasvaa virtauksen suunnassa. Painereunaehdot tai nopeusreunaehtojen lisäksi määritetyt staattiset paineet tunnelien rajapinnoille eivät tuota vakaita tai järkeviä tuloksia Autodesk CFD:llä tehdyissä simulaatioissa. Painereunaehdoilla virtausalueen sisälle syntyy erittäin suuria painekuplia, jotka kaatavat simulaation, jos painetasot määritellään nopeusrajaehtojen lisäksi. Toisaalta pelkillä painereunaehdoilla virtaus kääntyy molemmilla yksittäisillä tunneliosuuksilla kohti suuaukkoa kuten kuvassa 45. Kyseisessä simulaatiossa virtauksen suunta on sekä sisäradalla että ulkoradalla ulos tunnelista.

Kohti suurempaa painetta kulkevaa virtausta todennäköisesti tapahtuu tunnelissa, mutta ilmiön simuloiminen käyttämällä hyväksi lähtötietojen nopeus- ja painearvoja ei selvästi onnistu Autodesk CFD:n  $k - \epsilon$  turbulenssimallilla. Tästä syystä painereunaehdoja ei käytetä enää seuraavissa simuloinneissa.



Kuva 45. Nopeuskenttä ajanhetkellä  $t = 60$  s kun käytössä on pelkästään painereunaehdot.

Seuraavaksi simulaatioon lisätään liikkuva juna. Ensimmäisessä tilanteessa sisä- ja ulkoradan reunoille asetetaan tunnelin suuaukon kaltaisesti nollan Pascalin staattinen paine. Toisessa simuloinnissa reunaehdoksi asetetaan vapaa rajapinta, jolloin laskenta-alueen sisäpuolen virtaus määrittää reunan arvot. Näissä kahdessa simuloinnissa ei siis käytetä lähtötietojen massavirtareunaehdoja. Simuloidut nopeuskentät on esitetty kuvissa 46 ja 47.

Virtauksen nopeuskenttä on identtinen näiden kahden eri simulaation välillä. Junan saapuessa sisälle tunneliin se puskee ilmaa kohti molempia ratoja. Ilman nopeus on korkein junan välittömässä läheisyydessä liukumattomuusehdon takia. Virtauksen nopeus on myös suuri junan takana, jonne muodostuu melkein junan nopeutta kulkeva jättövirtaus. Jättövirtauksen nopeus laskee kuitenkin jo viidessä sekunnissa suunnilleen arvoon  $5 \text{ m/s}$ . Juna luo virtauksen myös kohti ulkorataa ja pyörteilyä alueelle, jossa virtaus irttaa junan jättövirtauksesta kohti ulkorataa. Nopeuskentät ovat näissä simulaatioissa siis käytännössä samat ja molemmat simulaatiot ovat vakaita. Vapaan rajapinnan reunaehdot toisaalta sallivat realistisemman painekentän tunnelin sisäisille reunoille, koska 0 Pascalin rajaehdon fyysikaalinen merkitys on käytännössä ulkoilmaan rajoittuva raja.

Seuraavaksi tarkastellaan kuvassa 27 esitettyjen nopeusreunaehdoiksi muunnettujen massavirtojen lisäämistä liikkuvan junan sisältävään simulaatioon. Edellisten simulaatioiden perusteella juna aiheuttaa tunneliin huomattavasti nopeampaa virtausta kuin mitä lähtötietojen reunaehdoissa. Jos esimerkiksi sisäradalle asetetaan lähtötietojen nopeuden reunaehto, kun juna ajaa sisään, syntyy laskenta-alueen sisälle suuri nopeusgradientti, koska nopeus muuttuu liian äkkiä reunalta reunaalle. Ilmiön epärealistisuus korostuu varsinkin silloin, kun juna lävistää reunaa,

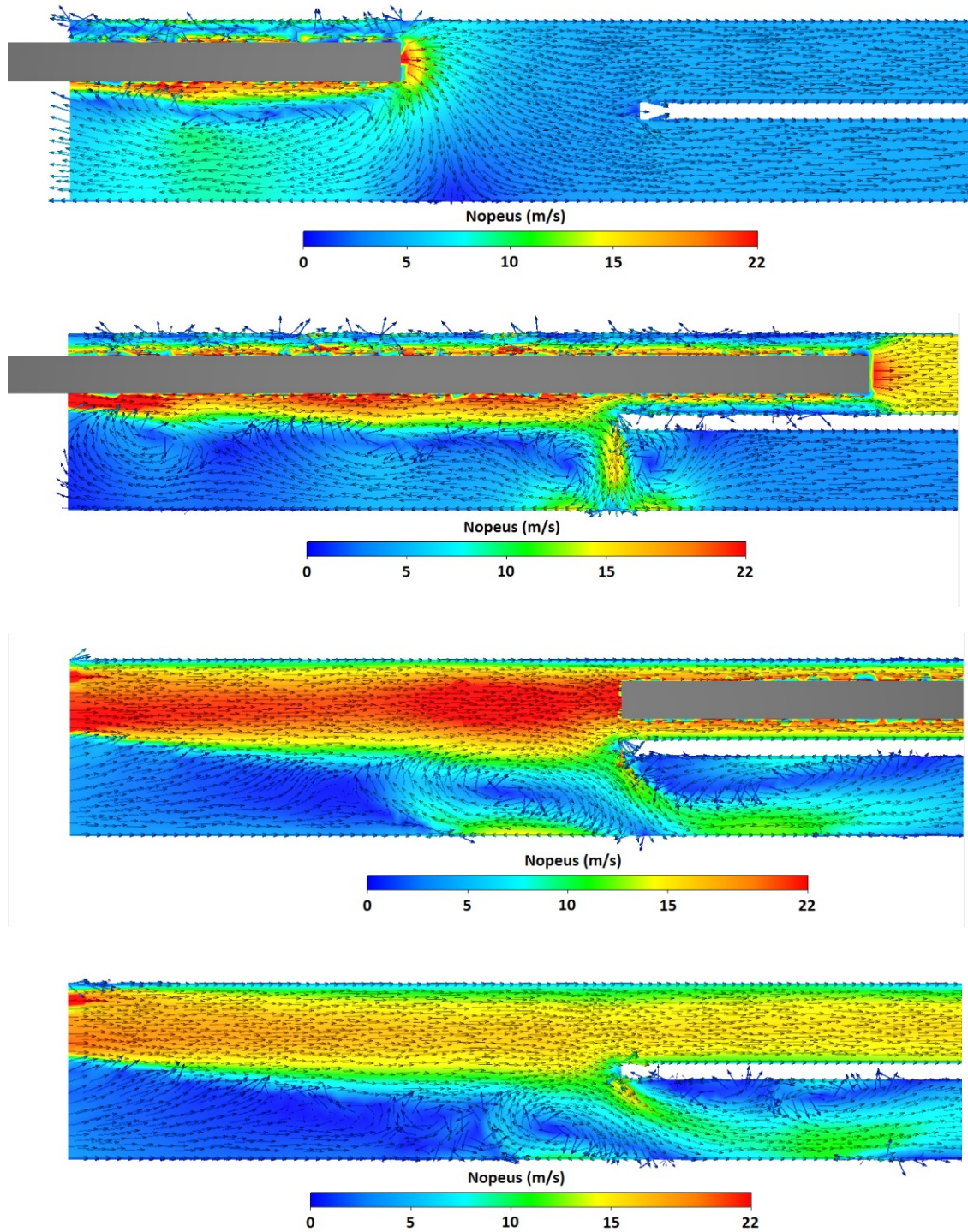


jolle on asetettu nopeusreunaehto. Tällöin juna näyttää häviävän reunan läheisyydessä, koska nopeus -reunaehto sisältää oletuksen, että reunalla on vain fluidikoppeja.

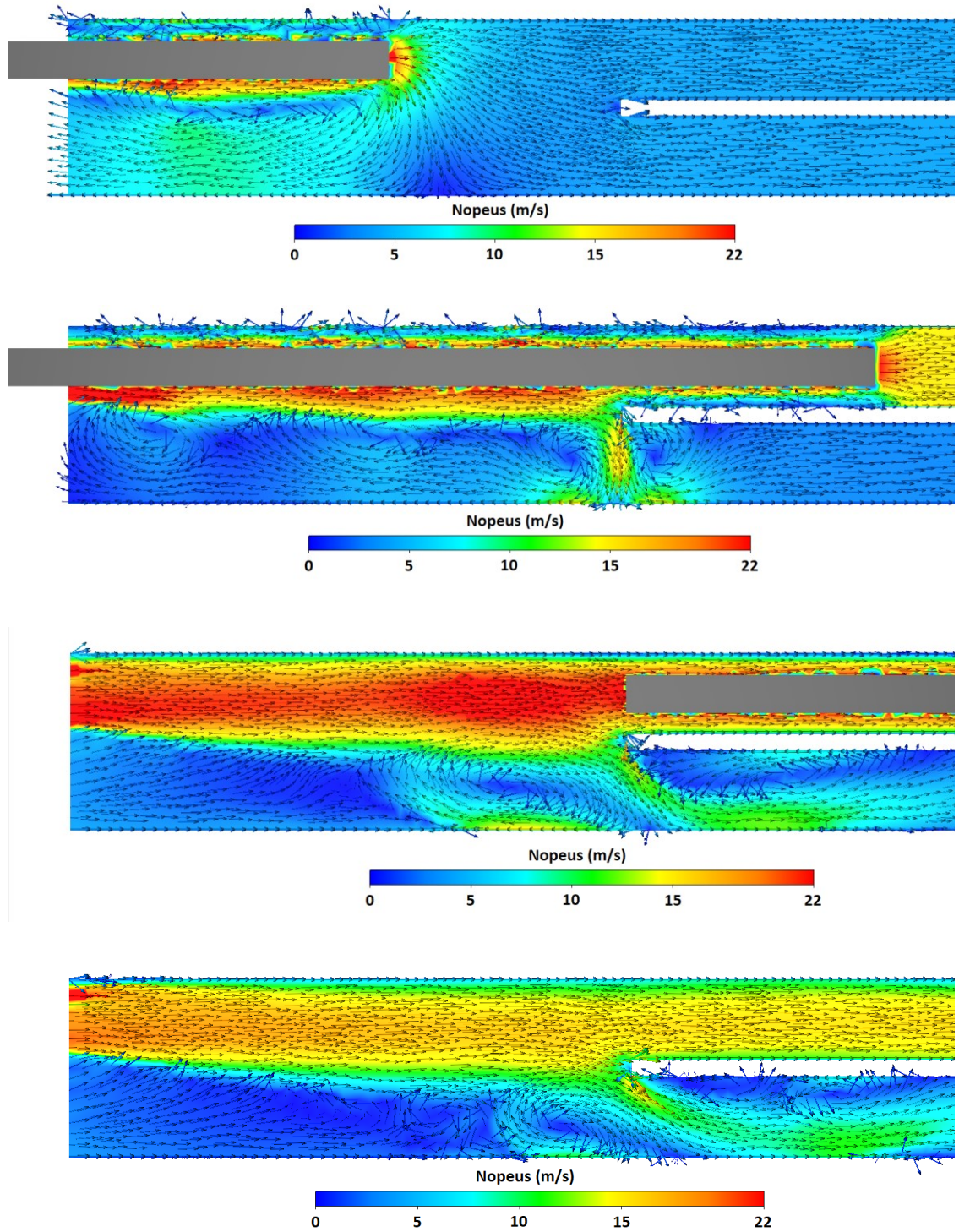
Kuvan 27 lähtötietoja on kuitenkin mahdollista hyödyntää niin, että ennen junan saapumista laskenta-alueelle virtauskenttä alustetaan niiden avulla. Eli ensin simuloidaan ajassa muuttumaton tilanne, jolloin simulaatioalueen sisälle muodostuu virtauskenttä. Näin vältetään tilanne, jossa fluidi olisi ajassa muuttuvan simulaation alussa levossa ja siihen kohdistuisi kohtuuttoman suuri kiihtyvyys. Ajassa muuttuva simulaatio aloitetaan alustuksen jälkeen niin, että poistetaan nopeusreunaehto siltä reunalta, jonka läpi juna kulkee simulaation aikana. Näin vältetään ristiriitaisten nopeuskenttien muodostuminen kyseisen reunan läheisyydessä.

Edellä kuvailtu tilanne, jossa virtauskenttä on ensin alustettu ja sen jälkeen nopeusreunaehto on poistettu toisesta yksittäisen tunnelin reunasta, on esitetty kuvassa 48. Kyseisessä tilanteessa ulkoradalle ei virtaa ilmaa junan vaikutuksesta, mutta staattinen paine kasvaa. Lisäksi junan poistuessa laskenta-alueelta ilman kiertäminen ulkoradalta sisäradalle vaikuttaa jatkuvan suuntavektoreiden perusteella jo 15 sekunnin kohdalla. Junan aiheuttamat paineenvaihtelut aiheuttavat lisäksi useampia pyörteitä tuplatunneliosuudelle kuin aikaisemmissa liikkuvaa junaa mallintavissa simulaatioissa.

Kaksiulotteisten simulaatioiden perusteella toimivia reunaehtoja ovat siis lämpötilaan ja reunojen virtausnopeuteen liittyvät reunaehdot, jotka esitettiin kuvissa 27 ja 28. Myös lähtötietojen junan sijaintitietoa on mahdollista hyödyntää yhdistämällä nopeusehdot toiselle radalle ja käyttämällä liikkuvan junan mallia toisella radalla vapaan rajapinnan kanssa. Pelkillä nopeusreunaehdoilla tehdyt simulaatiot johtivat melko erilaisiin virtauskenttiin kuin liikkuvaa junaa hyödyntävät simulaatiot. Todennäköisesti pelkkiä nopeusreunaehtoja hyödyntävät simulaatiot eivät siis tuota realistista kuvaa tunnelin suuaukon läheisestä virtauskentästä ja liikkuvaa junaa on käytettävä, jos simulaatioista halutaan käytännöllisiä johtopäätöksiä.

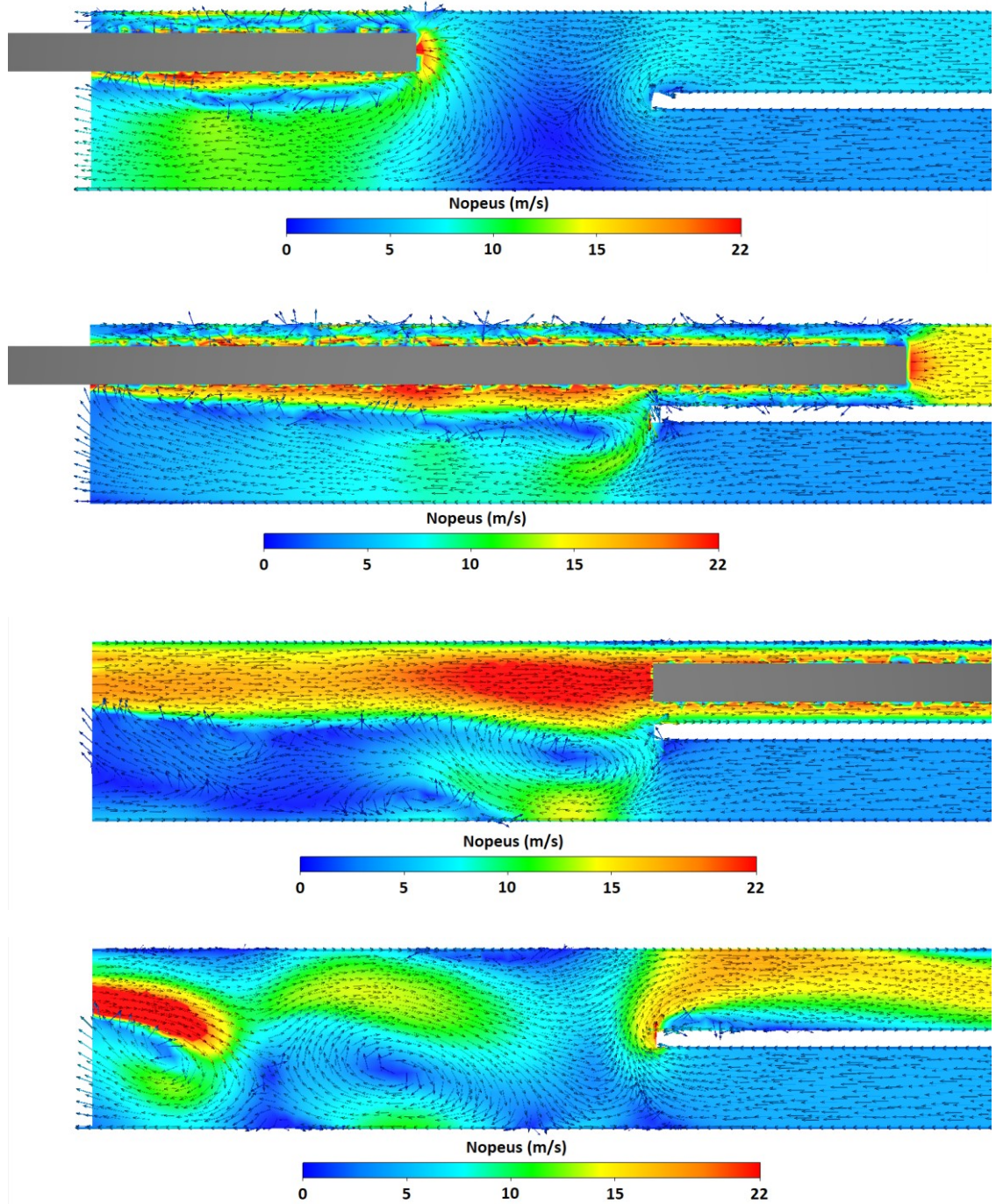


Kuva 46. Juna (merkitty harmaalla värillä) ajaa sisään tunneliin. Sisä- ja ulkoradalla reunaehtona 0 Pascalia  $t = \{2, 6, 10, 15\}$  s.



Kuva 47. Juna (merkitty harmaalla värillä) ajaa sisään tunneliin. Sisä- ja ulkoradalla reunaehtona vapaa raja  $t = \{2, 6, 10, 15\}$  s.





Kuva 48. Juna (merkitty harmaalla värillä) ajaa sisään tunneliin. Sisäradalla vapaa reuna ja ulkoradalla nopeusreunaehto  $t = \{2, 6, 10, 15\}$  s.

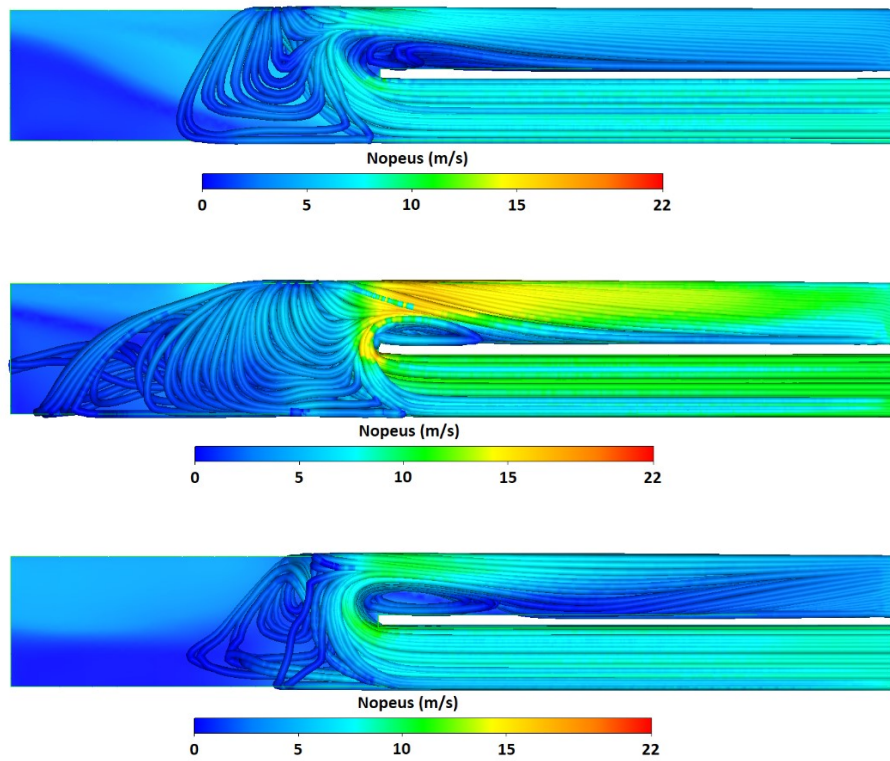
### 6.3 Kolmiulotteiset simulaatiot

Kolmiulotteiset simulaatiot aloitetaan käyttämällä kuvassa 27 esitettyjä massavirtoja ja kuvassa 28 esitetty ulkoraiteen lämpötilaa reunaehtoina, mutta ei mallinneta liikkuvaa juna. Valitaan kaksi 200 sekunnin pituista osuutta kuvissa esitetyistä sykleistä, jotka vastaavat samoja syklejä, joita käytettiin ensimmäisissä kaksiulotteisissa simulaatioissa. Ensimmäisessä kolmiulotteisessa simulaatiossa juna ajaa lähtötietojen perusteella sisään tunneliin 50 sekunnin kohdalla. Toisessa simulaatiossa juna ajaa lähtötietojen perusteella ulos ulkoradalta 50 sekunnin kohdalla.

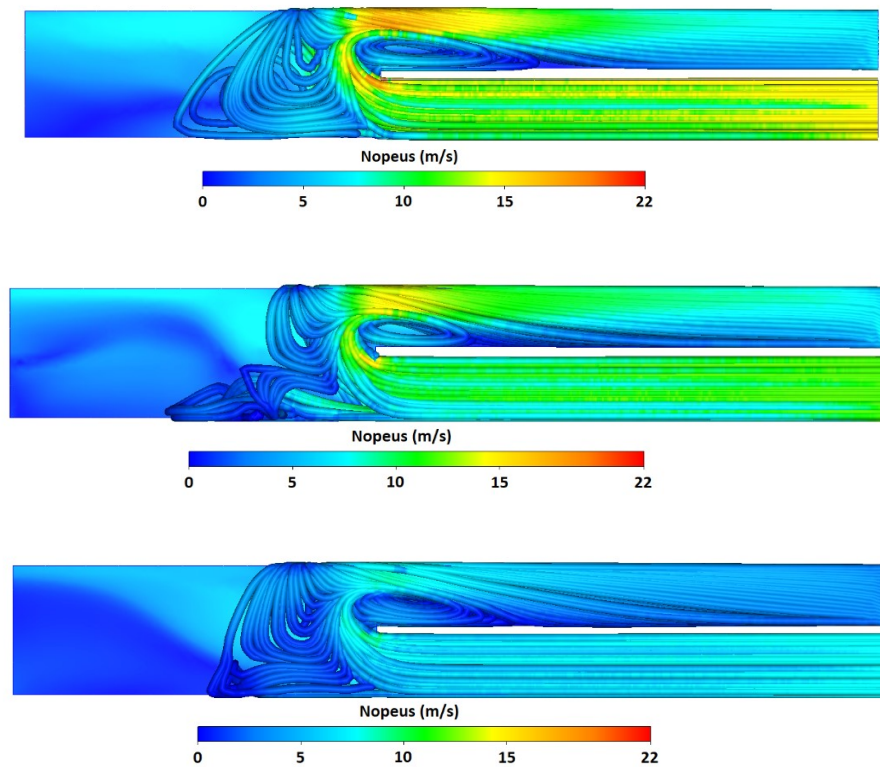
Käytännössä tulokset ovat yhtäpitäviä kaksiulotteisten tulosten kanssa ja kuten edellä todettiin eivät todennäköisesti anna realistista kuvaa suuaukon läheisestä virtauskentästä varsinkin silloin, kun juna ajaisi virtausalueen läpi. Kiinnostavaksi kolmiulotteisen tarkastelun kyseisillä reunaehdoilla tekee kuitenkin se, että laskenta-alueelle on mahdollista määritellä poikkileikkaus ja seurata kyseiseen poikkileikkaukseen saapuvan fluidin matkustamaa rataa. Kuvissa 49 ja 50 on määritelty sisäradan reunan läheisyyteen tällainen poikkileikkaus, jotta nähdään mistä sisäradalle kulkeva ilma on peräisin. Ensimmäisessä simuloinnissa pieni osa ilmasta 80 sekunnin kohdalla on peräisin tunnelin ulkopuolelta. Molemmissa simulaatioissa sisäradan fluidi on käytännössä kuitenkin melkein koko laskentatilanteen ajan peräisin ulkoradalta.

Kaksi- ja kolmiulotteisissa simulaatioissa pelkillä nopeus- tai massavirtareunaehdoilla ilma siis kaartuu tunneligeometriassa yksittäisestä tunnelista toiseen molemmissa simulaatiotilanteissa käytännössä aina, kun sisäradan nopeus tai massavirta on pienempi kuin ulkoradan. Sama ilmiö oli havaittavissa, vaikka tuplatunnelin pituus lyhennettiin kaksiulotteisissa simulaatioissa jopa kymmeneen metriin eli kiertäminen ei ole herkkä pienille dimension muutoksille. Ilman liikkuvaa juna simulaatiot antavat todennäköisesti liian positiivisen kuvan ilman kiertämisestä yksittäisten tunnelien välillä. Kuitenkin tuloksista voidaan päätellä, että silloin kun juna ei vaikuta suuaukon virtauskenttään, ilman kiertämistä tapahtuu tuplatunnelin alussa käytännössä niin paljon, että melkein kaikki sisäradalle virtaava ilma on peräisin ulkoradalta.

Tunnelin jäätyminen näkökulmasta lämmittävää ilmaa kiertää sisäradalle merkittävästi ainakin silloin, kun juna ei vaikuta suuaukon läheiseen virtauskenttään ja yksittäisten tunnelien massavirtojen suhteet ovat oikeat. Ilmiötä voi todennäköisesti lisätä tai pienentää vaikuttamalla yksittäisten tunneleiden massavirtojen suhteeseen käyttämällä ilmanvaihtotekniikkaa kuten esimerkiksi impulssipuhaltimia. Kyseinen tilanne on erityisen merkittävä esimerkiksi yöaikana, kun junat eivät kulje moneen tuntiin. Tällöin yksittäisten tunneleiden massavirtojen suhdetta voidaan luultavasti ohjailla luotettavimmin niin, että ilman kiertäminen varmistetaan ja pienennetään suuaukosta koituvaa lämpöhäviötä.



Kuva 49. Ensimmäinen simulaatiotilanne pelkillä massavirtareunaehdoilla  $t = \{60, 80, 180\}$  s.



Kuva 50. Toinen simulaatiotilanne pelkillä massavirtareunaehdoilla  $t = \{60, 80, 180\}$  s

Seuraavaksi tarkastellaan kolmiulotteisia simulaatioita, joissa on liikkuva juna. Kolmiulotteisissa liikkuvaa junaa käyttävissä simulaatioissa laskenta-alueelle luodaan alkutilanne käyttämällä ensin reunoilla lähtötietojen massavirtareunaehdoja sekuntia ennen ajanhetkeä, jolloin juna saapuu simulaatioalueelle. Reunaehdot pysyvät samoina tuhat iterointia. Tämän jälkeen sen yksittäisen tunnelin reunalle, jonka läpi juna kulkee, asetetaan avoimen reunan reunaehto ja toisen yksittäisen tunnelin reunalle ajassa muuttuva massavirta, joka on kuvan 27 mukainen.

Kuvassa 51 on edellisten simulaatioiden tapaan sisäradalle kantautuvan ilman alkuperä sen liikeradan avulla. Alkutilanteessa ilma kiertää ulkoradalta sisäradalle kuten edellisissä simulaatioissa. Junan saapuessa laskenta-alueelle ilma vaikuttaa kulkeutuvan pelkästään junan mukana kohti sisärataa eikä kiertämistä ole ollenkaan. Junan poistuessa laskenta-alueelta ilman nopeus on sisäradalla vielä suuri ja vaikka ilman kiertäminen ulkoradalta sisäradalle alkaa niin ilmaa kulkeutuu junan jättövirtauksessa tunnelin ulkopuolelta sisäradalle vielä 20 sekuntia laskennan alun jälkeen eli noin 7 sekuntia sen jälkeen, kun juna poistuu alueelta.

Kuvan 52 nopeuden suuntavektoriesityksessä on ilman nopeuskentän kehitys junan takana. Heti junan jälkeen jättövirtauksen nopeus on käytännössä sama kuin junalla. Kuitenkin alle 10 sekuntia junan poistumisesta ilman nopeus on hidastunut jo välille  $10 - 15 \text{ m/s}$  ja noin 27 sekunnin jälkeen välille  $5 - 10 \text{ m/s}$ . Fluidin liikerataa ja suuntavektoreita esittävissä kuvissa on erittäin paljon pyörteilyä tuplatunnelin osuudella.

Kuvassa 53 on staattisen paineen kehitys laskenta-alueella junan ajaessa sisään tunneliin. Staattinen paine on suurin junan keulassa keulan ollessa laskenta-alueella. Lisäksi korkea staattinen paine jakaantuu ulkoradalle, jossa massavirralla asetettu reunaehto pakottaa fluidin liikesuunnan ulos tunnelista. Keulan jälkeen junan sivuilla staattinen paine pienenee, kunnes junan poistuessa laskenta-alueelta paine muuttuu negatiiviseksi. Jäljelle jääneet pyöreät painejakaumat aiheuttavat pyörteilyä ja ilman sekoittumista vielä jonkun aikaa sen jälkeen, kun juna poistuu laskenta-alueelta.

Ajassa muuttumattomien alkuiterointien takia simulaatioalueen lämpötilajakauma on samalla tavalla levittynyt kuin kaksiulotteisten nopeusreunaehdoilla tehtyjen simulaatioiden lopussa. Kuvassa 54 lämpötilajakauma muuttuu, kun juna tuo mukanaan tunnelin suuaukolta kylmempää ilmaa. Junan ohituksen jälkeen tuplatunneliin muodostuva pyörteily sekoittaa ilmaa, jolloin koko tuplatunneliosuus on viileämpi ja sisärata jäähtyy myös vaikkakin ilman kiertämisen alkaessa uudelleen lämpötila alkaa jälleen kasvaa.

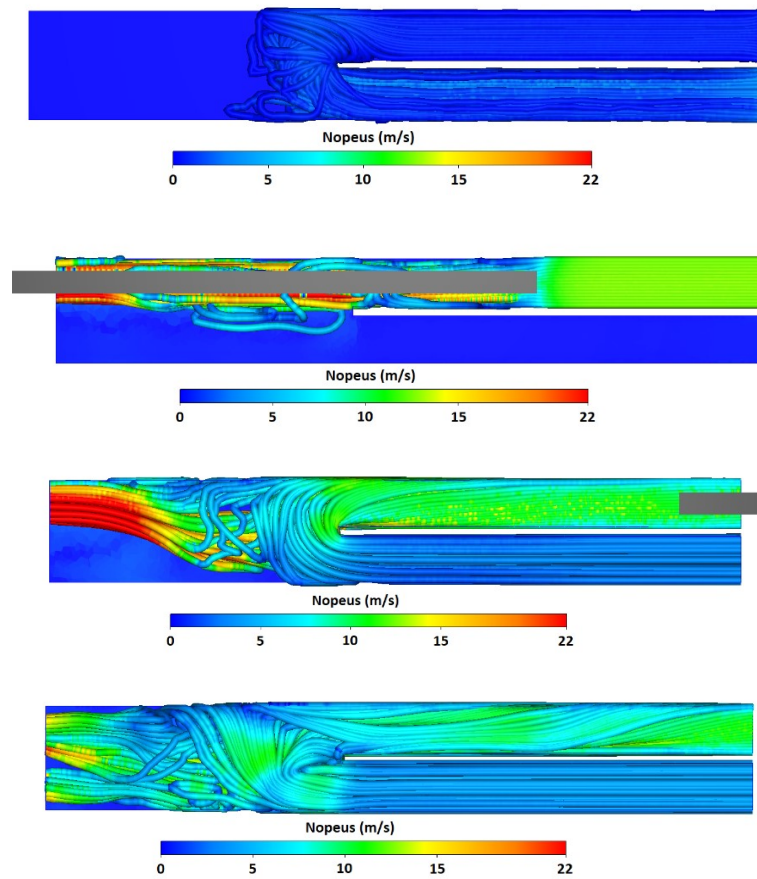
Kuvassa 55 on ilman nopeus ja staattinen paine kuvassa 32 esitetyissä mittauspisteissä eli 20 metrin päästä molempien tunnelien reunalta yksittäisen radan keskilinjalta, mutta junan yläpuolelta. Ulkoradalla ilman nopeus pysyy massavirtareunaehtojen mukaisena, mutta staattinen paine kasvaa radalla huomattavasti. Sisäradalla ilman nopeus kasvaa suunnilleen junan nopeuden mukaiseksi mutta alkaa laskea 15 sekunnin kohdalla, kun junan jättövirtaus heikkenee. Sisäradan paineenvaihtelu on suurin junan saapuessa tunneliin ja keulan nostaessa painetta. Junan perässä staattinen paine sisäradalla ei enää heilu huomattavasti.

Juna siis tuo kylmää ilmaa mukanaan tunneliin ja kylmän ilman virtaus jatkuu hetken aikaa junan aiheuttaman jättövirtauksena. Aikaväli, jolla ilmaa ei kierrä ollenkaan ulkoradalta sisäradalle vaikuttaa kuitenkin olevan alle 10 sekuntia. Puhaltamalla ilmaa kohti sisään ajavaa junaa sisäradalla voidaan myös todennäköisesti pienentää tunneliin

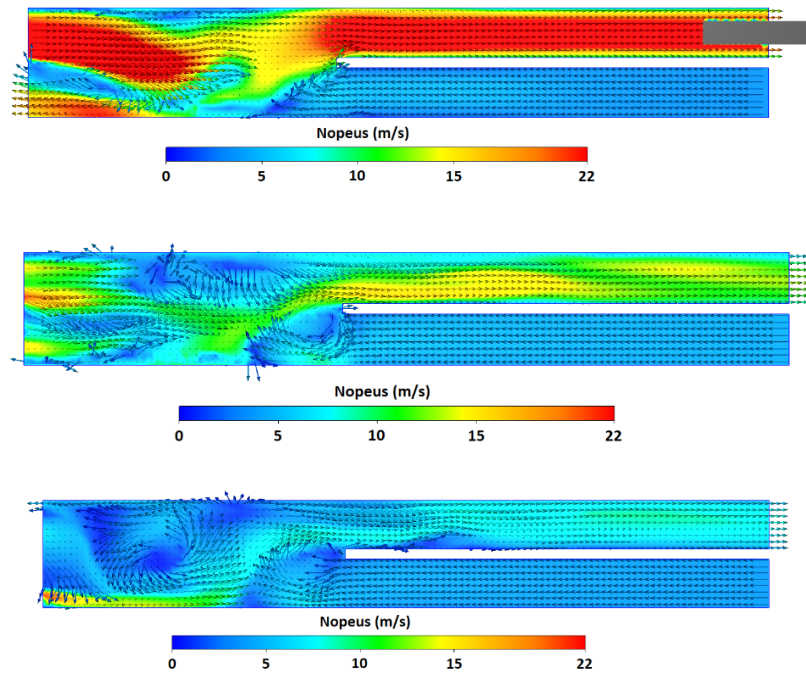
kulkevan kylmän ilman määrää ja junan ohituksen jälkeen hidastaa sen jättövirtausta. Ilman pyörteily tuplatunneliosuudella on jäätymisen kannalta hyvä asia, koska pyörteet lisäävät ulkoradalta virtaavan lämpimän ilman ja suuaukolta virtaavan kylmän ilman sekoittumista ja lämmön siirtymistä niiden välillä.

Kaksiulotteisissa simulaatioissa, joissa ei käytetty ulkoradalla nopeusreunaehtoja, virtaus kulki myös ulkoradalla sisään tunneliin junan ajaessa sisään. Kolmiulotteisista simulaatioista havaitaan, että paine ulkoradalla kasvaa erittäin suureksi, koska virtauksen on vastustettava liikesuunta kohti tunnelia. Käytännössä tämä tarkoittaa, että junan ajaessa sisään ilmaa todennäköisesti virtaa suuaukolta myös ulkoradalle aiheuttaen ulkoradalle jäätymisriskin, jos tällöin ilmaa ei puhalleta myös ulkoradalla ulos tunnelista.

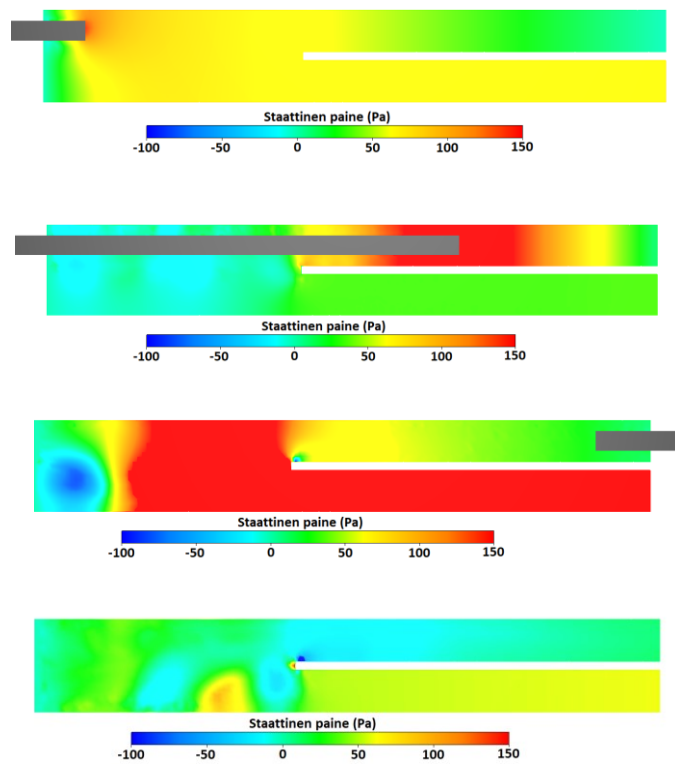




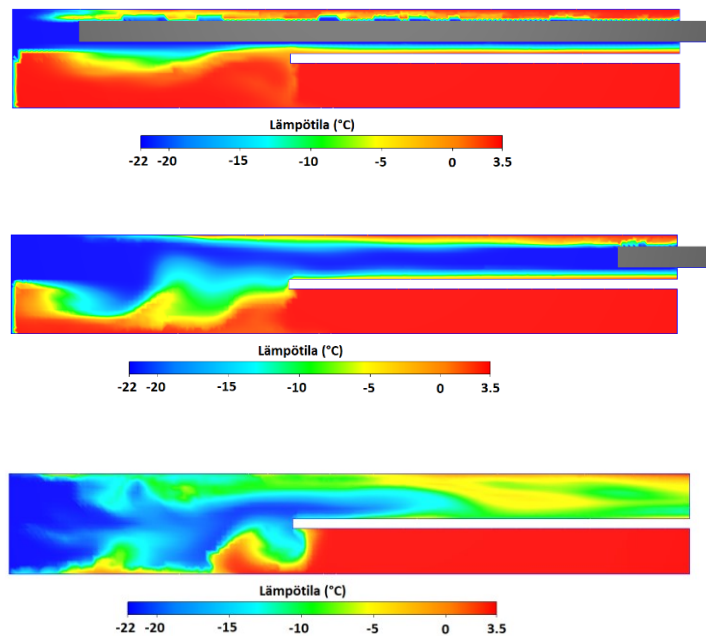
Kuva 51. Sisäradalle kulkevan ilman alkuperä, kun juna (merkitty harmaalla) ajaa sisään  $t = \{0, 4, 12, 20\}$  s.



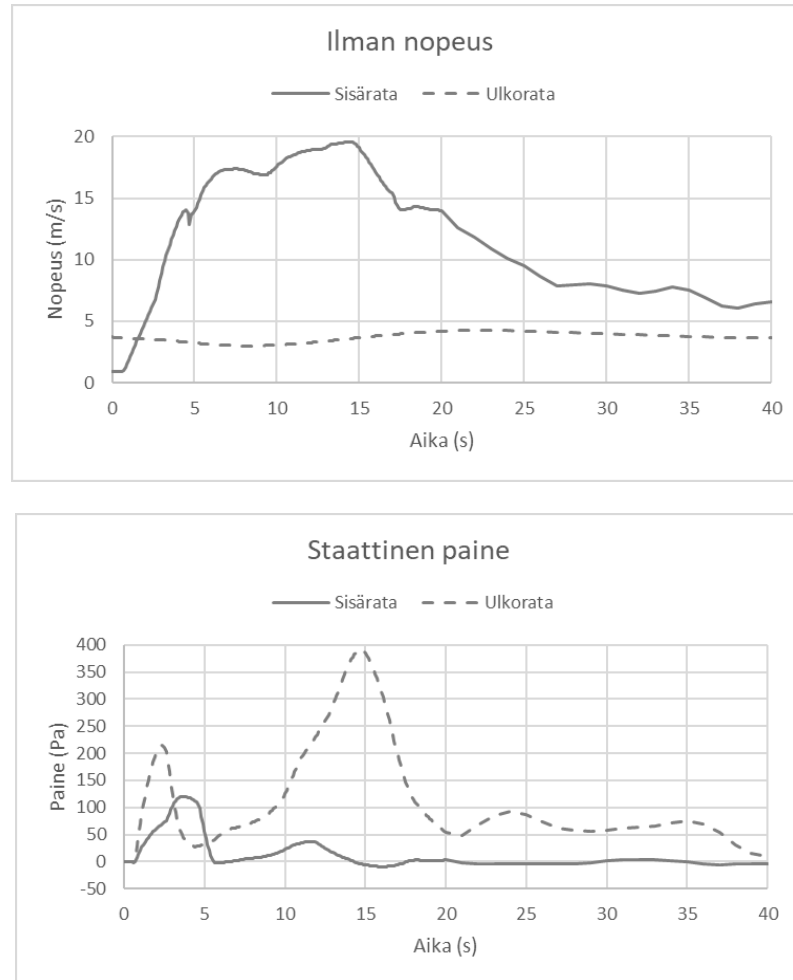
Kuva 52. Ilman nopeuden suuntavektoriesitys tunnelin keskikorkeudelta leikkauksena, kun juna (merkitty harmaalla) ajaa sisään ajanhetkellä  $t = \{12, 20, 40\}$  s.



Kuva 53. Staattinen paine tunnelin keskitasolla leikkauksena, kun juna (merkitty harmaalla) ajaa sisään  $t = \{1, 4, 12, 20\}$  s.



Kuva 54. Lämpötila tunnelin keskitasolla leikkauksena, kun juna (merkitty harmaalla) ajaa sisään  $t = \{8, 12, 20\}$  s.



**Kuva 55. Sisä- ja ulkoradan ilman nopeus ja staattinen paine 20 metriä laskenta-alueen reunalta junan ajaessa sisään.**

Seuraavassa simulaatiossa juna ajaa ulos ulkoradalta. Kuvassa 56 virtausradat kohti sisärataa alkavat venyä junan ohittaessa tuplatunnelin alun. Osa sisäradalle kulkevasta ilmasta on peräisin tunnelin ulkopuolelta sen jälkeen, kun juna on kokonaan ohittanut yksittäiset tunnelit. Kuvan 57 perusteella nopea ilma junan takana ei kierrä ulkoradalta sisäradalle melkein ollenkaan. Virtauksen nopeus laskee kuitenkin samalla tavalla nopeasti kuin junan ajaessa sisään tunneliin.

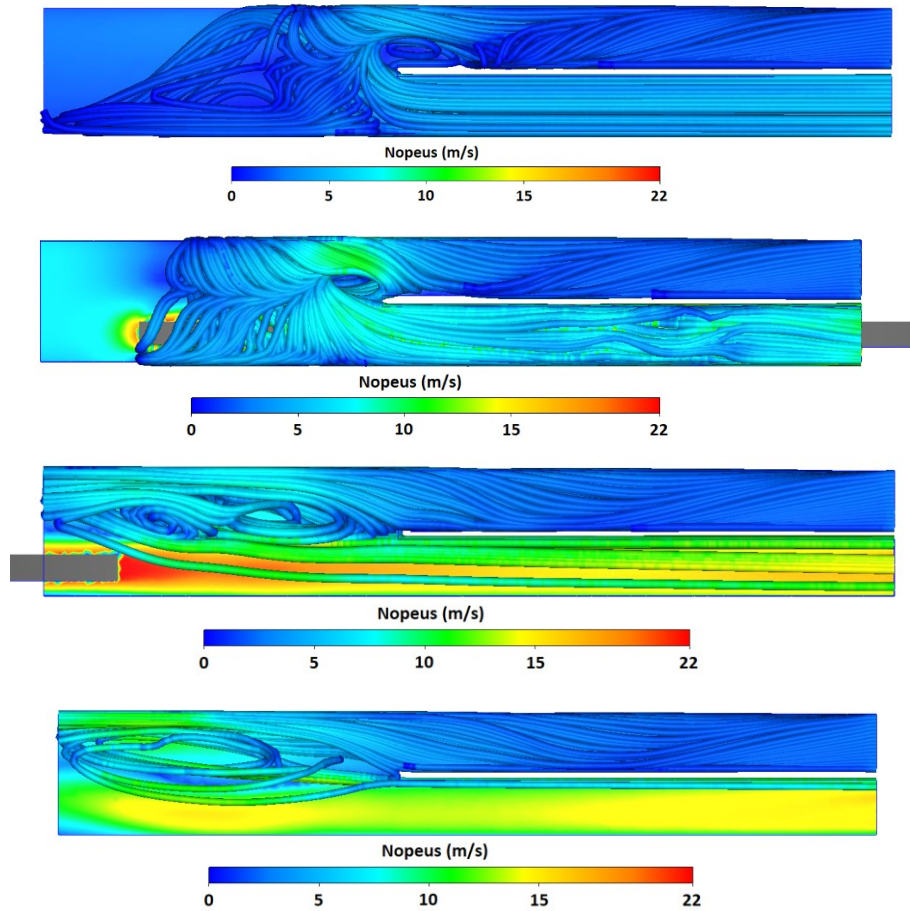
Kuvassa 58 staattinen paine kasvaa junan keulassa samalla tavoin kuin junan ajaessa sisään ja laskee matkalla keulalta perään, kunnes junan perässä ulkoradalle muodostuu negatiivinen staattinen paine. Nyt sisäradalle asetettu massavirran reunaehto aiheuttaa myös suuren negatiivisen paineen syntymisen, jotta reunaehdon asettama virtaussuunta säilyy. Junan poistuessa laskenta-alueelta koko alueelle jää ulkoilman vertailupainetta pienempi staattinen paine. Nopeuden suuntavektoreita esittävässä kuvassa virtauksen suunta onkin lopulta kääntynyt myös ulkoradalla kohti ulkoradan tunnelia sinne jääneen alhaisemman painetasen vaikutuksesta. Kuvassa 59 tunneliin virtaava kylmä ilma alkaa jäähdyttää sisäradan puoleisen tuplatunnelin osaa ulkoa virtaavan ilman määrän lisääntyessä.

Kuvassa 60 ilman nopeus ja staattinen paine on mitattuna samasta pisteestä kuin edellisessä tilanteessa eli 20 metriä molempien yksittäisten tunnelien reunoilta tunnelin keskeltä junan yläpuolelta. Nyt sisäradalla ilman nopeus pysyy massavirran reunaehto-

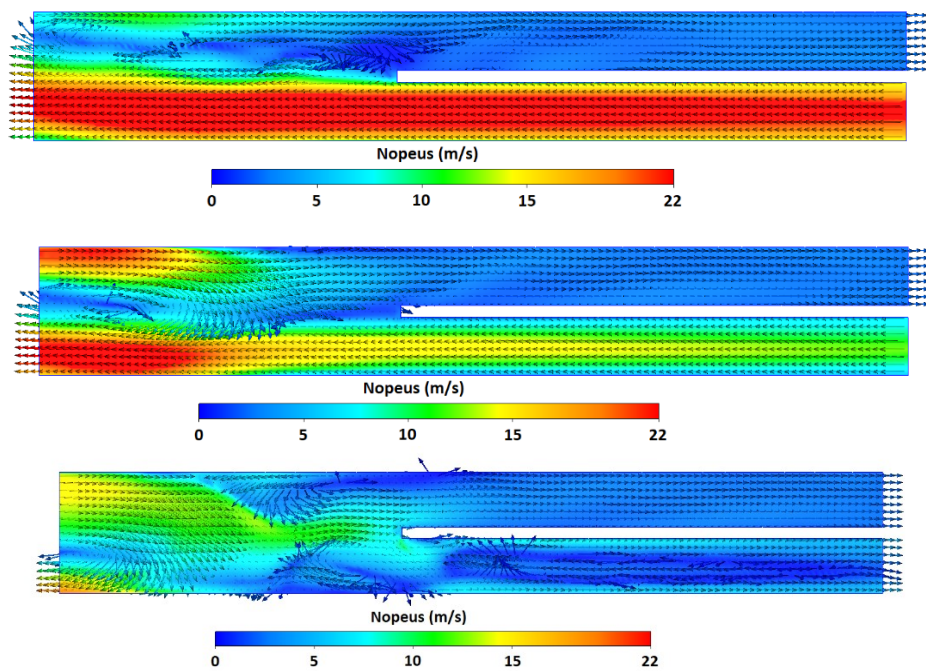
mukaisena, mutta staattinen paine kasvaa reilusti simulaation alkutilanteessa. Ulkoradan nopeus kasvaa junan ohittaessa mittauspisteen ja laskee jättövirtauksen heikentyessä. Nopeuden lasku nolleen ja sen jälkeen kasvaminen ylös kuvaa ajanhetkeä, jolloin virtauksen suunta kääntyy.

Ilman nopeus ulkoradalla kiihtyy junan vaikutuksesta niin nopeaksi, että kiertämistä ei tapahdu junan ajaessa ulos tunnelista. Tässä tilanteessa sisäradalle virtaa kylmää ilmaa, joka aiheuttaa suuren jäätymisriskin. Jättövirtauksen rauhoittuessa ilman nopeus pienenee, mutta simulaatioissa ulkoradalle jääneen negatiivisen painekentän takia ilman kiertäminen ei enää voimistu samalla tavoin kuin junan ajaessa sisään vaan virtaus kääntyy kohti ulkorataa. Ulkoradalle virtaava kylmä ilma lisää tässä tilanteessa jäätymisriskiä entisestään.

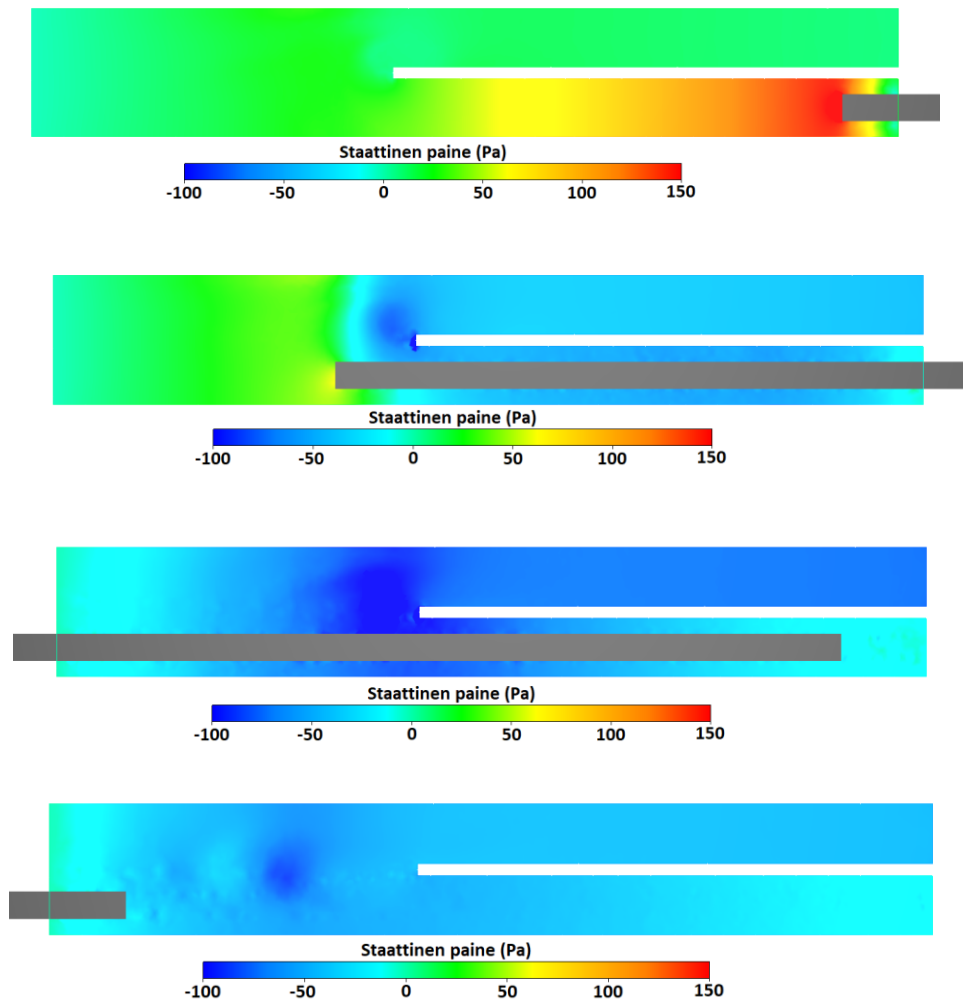
Junan ajaessa ulos ilmaa pitää siis puhaltaa kohti tunnelia, jotta sen nopeus ei kasva liian suureksi, jolloin ilman kiertäminen vähenee huomattavasti. Tämän jälkeen puhalluksen suunta on käännettävä takaisin kohti tunnelin suuaukkoa, jotta estetään kylmän ilman virtaus ulkoradalle ja pienennetään jäätymisriskiä.



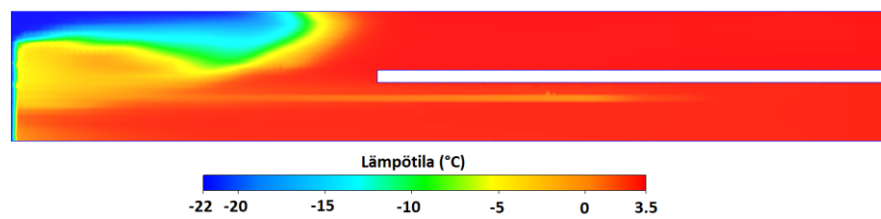
Kuva 56. Sisäradalle kulkevan ilman alkuperä, kun juna (merkitty harmaalla) ajaa ulos  $t = \{0, 5, 12, 15\}$  s.



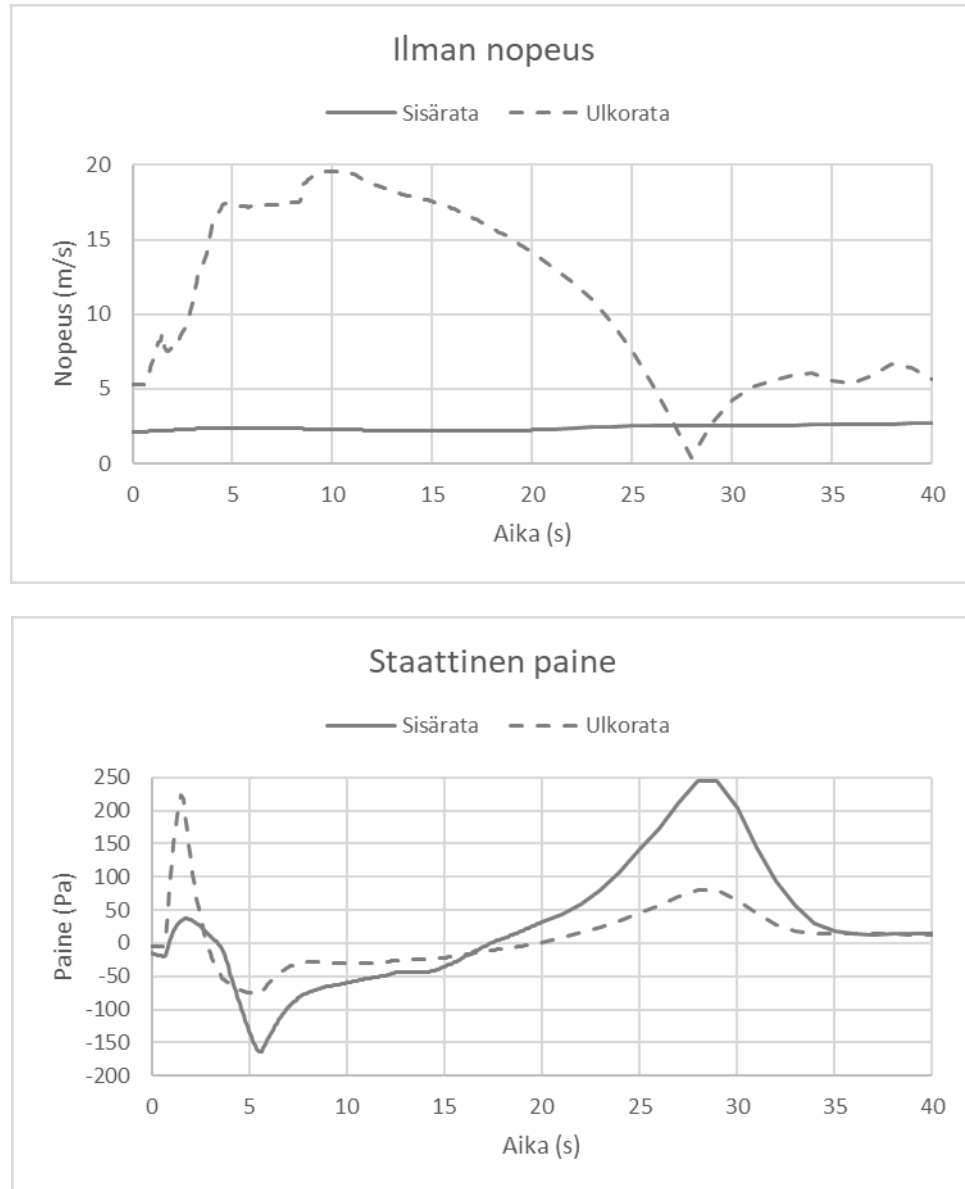
Kuva 57. Ilman nopeuden suuntavektoriesitys tunnelin keskikorkeudelta leikkauksena, kun juna on ajanut ulos ajanhetkellä  $t = \{15, 20, 30\}$  s.



Kuva 58. Staattinen paine tunnelin keskitasolla leikkauksena, kun juna (merkitty harmaalla) ajaa ulos  $t = \{1, 4, 8, 12\}$  s.



Kuva 59 Lämpötila tunnelin keskitasolla leikkauksena, kun juna on ajanut ulos  $t = 20$  s.



**Kuva 60. Sisä- ja ulkoradan ilman nopeus ja staattinen paine 20 metriä laskenta-alueen reunalta junan ajaessa ulos.**

## 7 Pohdinta

### 7.1 Validointitutkimus

Autodesk CFD:llä tehtyjä junatunnelin simulointiin liittyviä tutkimuksia ei löytynyt kirjallisuudesta. Ohjelmassa käytettyjen menetelmien validoimiseksi tässä tutkimuksessa simuloitiin aluksi aikaisemmassa tutkimuksessa tutkittu tilanne, josta oli saatavilla kokeellisesti mitattua aineistoa. Tutkimuksessa käsitelty tunneli ja juna olivat 1:20 skaalattu pienoismalli realistisesta tilanteesta.

Simulaatioiden perusteella Autodesk CFD mallintaa tunnelin suuaukkojen nopeuskentät hyvin, mutta mittauspisteiden painetasot olivat selkeästi aineistoa suuremmat vaikkakin laadullisesti seurasivat paineenkehityksessä tapahtuvia ilmiöitä hyvin. Tulosten tarkkuuteen vaikuttaa varmasti paljon Autodesk CFD:n rajoitteet hilaverkon luomisessa. Esimerkiksi junan seinälle ei ollut mahdollista luoda samanlaista rajakerroshilaa kuin mitä vastaavissa tutkimuksissa on käytetty. Lisäksi seinän rajakerroksessa ei ollut mahdollista käyttää kovinkaan montaa kappaletta ilman että simulaatioiden vakaus kärsisi huomattavasti.

Autodesk CFD:n manuaalisessa hilan luomiseen tarkoitetussa työkalussa valitaan pelkästään kappikoko ja se on sama jokaiseen koordinaattisuuntaan. Junatunnelin mallinnuksessa kopit voisivat olla pitkittäissuunnassa pidempiä, kuin tunnelin poikkileikkauksen suunnassa, jolloin pitkän tunnelin mallinnukseen ei välttämättä kuluisi niin montaa kappaletta ilman että tarkkuus kärsisi, jolloin hilaverkosta voisi tehdä tarkemman lisäämättä koppien lukumäärää.

Autodesk CFD -ohjelman liikemoduuli tuottaa siis laadullisesti oikeansuuntaisia tuloksia, mutta simulaatioiden perusteella tulokset ovat huonompia kuin esimerkiksi muissa tutkimuksissa ANSYS-simulointiympäristöllä saavutetut, jonka takia myös Pissararataa koskevista simulaatioista voisi mahdollisesti saada luotettavampia tuloksia vertailemalla eri ohjelmistoilla tehtyjä simulaatioita.

Validointitutkimuksessa käytetty mittausaineisto oli peräisin pienoismallikokeesta. Pienoismallit eivät ole aina täysin verrattavissa todelliseen tilanteeseen. Tässä tutkimuksessa pienoismallijunan nopeus oli esimerkiksi huomattavasti pienempi kuin Pissararadasta tehdyissä simulaatioissa. Toisaalta molemmissa tapauksissa nopeus oli riittävä siihen, että virtaus oli täysin turbulenttista ja toisaalta riittävän alhainen, että virtaus voidaan olettaa kokoon puristumattomaksi molemmissa tilanteissa. Täysikokoisen mallin validoimiseksi olisi kuitenkin parasta käyttää tutkimusaineistoa täysikokoisesta kokeellisesta tutkimuksesta.

### 7.2 Pissararadan junatunnelin suuaukon simulaatiot

Tässä työssä mallinnettiin Pissararata-hankkeeseen liittyen junatunnelin suuaukko ja tutkittiin suuaukon ja sitä ennen sijaitsevan tuplatunneliosuuden virtausolosuhteita. Tutkimuksessa vertailtiin IDA Tunnel-ohjelmistolla luotuja reunaehdoja ja Autodesk CFD:n liikemoduulin toimivuutta kaksikulotteisella mallilla sekä lopuksi simulointiin toimivat tilanteet kolmiulotteisesti. Simulaatioissa vertailtiin nopeus-, paine- ja lämpötilareunaehdoja sekä mallinnettiin liikkuva juna, joka kulki tunneligeometrian läpi.

Tuloksista huomattiin, että painereunaehdojen käyttäminen oli ongelmallista eikä niillä ollut mahdollista saavuttaa järkeviä tai vakaita simulaatioita. Autodesk CFD:n  $k - \epsilon$



turbulenssimalli ei osannut ratkaista virtausta kohti suurempaa painetta. Painereunaehdojen käyttämistä voisi kuitenkin kokeilla toimivatko ne sellaisella turbulenssimallilla, jonka tiedetään ratkaisevan hyvin tällaiset tilanteet, kuten esimerkiksi  $k - \omega$  SST turbulenssimallilla.

Nopeus- ja lämpötilareunaehdot sen sijaan vaikuttivat toimivan hyvin ilman junaa ja osittain myös liikkuvan junan kanssa. Nopeusreunaehdojen fysikaalinen merkitys on, että virtaukseen vaikuttavat tekijät kuten ilmanvaihtolaitteet sijaitsevat riittävän kaukana reunasta katsottuna sisälle tunneliin, jotta virtaus on reunaehdon poikkileikkauksessa täysin kehittynyttä. Toisaalta nopeusreunaehdon käyttäminen tunnelin sisäisellä reunalla on ongelmallista, koska reunaehto asettaa saman nopeuden koko reunan poikkileikkaukselle. Tilanne olisi realistisempi, jos virtausmallinnusohjelma osaisi muodostaa täysin kehittyneen nopeusjakauman reunalle ajasta riippuvassa laskennassa.

Liikkuvan junan kanssa tehdyissä simulaatioissa havaittiin, että juna ei voi kulkea sellaisen reunan läpi, jolle on määritetty nopeusreunaehto, koska se tuottaa simuloidulle alueelle ristiriitaisia nopeuskenttiä. Tästä syystä päädyttiin hyödyntämään avointa rajapintaa siihen reunaan, jonka läpi juna kulkee. Kaksiulotteisissa simuloinneissa havaittiin myös, että virtauskenttään syntyy simulaation aluksi erittäin suuri paineaalto luultavasti suuren kiihtyvyyden tai kokoonpuristumattomuus oletuksen takia. Simuloinneissa käytettiin reunoilla alkuehtoja, joiden pitäisi tuottaa virtausalueelle alkutilanne, jossa fluidi ei ole levossa, mutta tämä ei riittänyt paineaallon pienentämiseen. Paineaalto pieneni kuitenkin, kun alkutilannetta iteroitiin riittävän monta kertaa ajassa muuttumattomana tilanteena ennen kuin siirryttiin ajassa muuttuviin reunaehtoihin. Toinen vaihtoehto paineaallon pienentämiseen olisi luultavasti aloittaa reunaehdot nolasta ja kiihdyttää ne hiljalleen lähtötietojen mukaisiksi. Kyseinen menetelmä voisi olla fysikaalisesti realistisempi, kuin ajassa muuttumattoman tilanteen käyttäminen alkutilanteena, koska tunnelin virtauskenttä kuitenkin muuttuu jatkuvasti ja ajassa muuttumattomana iteroiminen saattaa johtaa liian kehittyneeseen virtauskenttään.

Junan ajaessa ulos ulkoradalta, junan perään jäi negatiivinen painekenttä, joka johti simulaatioissa lopulta virtauksen kääntymiseen kohti ulkorataa. Käytännössä virtaussuunta ei luultavasti käännä, koska alipainetta kohti virtaavaa ilmaa riittää tunnelin sisältä ja kyseessä on luultavasti vain reunaehdojen määrityksestä johtuva virhe.

Simulaatiot eivät olleet riittävän vakaita junan poistuttua simulaatioalueelta, että niillä olisi voinut selvittää luotettavasti sitä aikaa, minkä junan jättövirtaus vaikuttaa simulaatioalueeseen. Toisaalta ilman nopeus pieneni jo 10 sekunnin kuluttua alle puoleen junan aiheuttamasta huippuarvosta ilman, että olisi käytetty erillistä virtausnopeutta hidastavaa ilmanvaihtotekniikka.

Tuloksista voidaan siis päätellä, että ilmaa kiertää kahden yksittäisen tunnelin välillä, jos olosuhteet ovat oikeat. Havaittuja vaikuttavia tekijöitä olosuhteisiin ovat liikkuvan junan vaikutus ilman virtaukseen ja ilmavirtojen suuruudet kahden yksittäisen tunnelin välillä. Käytännössä kiertoilmiö ei vaikuta olevan erityisen herkkä pienille muutoksille tuplatunnelin pituudessa, mutta esimerkiksi junan kulkunopeutta pienentämällä voisi luultavasti pienentää sitä ilman määrää, jonka juna tuo tunneliin. Lisäksi muissa aiheeseen liittyvissä tutkimuksissa on huomattu, että puhaltamalla ilmaa tunneliin sisään ajavaa junaa voidaan pienentää kylmän ilman kulkeutumista tunneliin. Samalla tavoin puhaltimilla voitaisiin luultavasti heikentää junan vaikutusta tuplatunnelin virtauskenttään ja saavuttaa ohituksen jälkeen helpommin tilanne, jossa ilma alkaa taas kiertämään kahden tunnelin välillä. Tunneleissa käytetyissä impulssipuhaltimissa on

toisaalta usein todella suuri heittopituus ja jos puhallin sijaitsee esimerkiksi jommallakummalla yksittäisellä radalla liian lähellä tuplatunnelin alkua voi kasvanut virtauksen nopeus heikentää kiertoilmiötä. Impulssipuhaltimien vaikutusta kiertoilmiöön voisi tutkia lisää kolmiulotteisilla virtaussimulaatioilla.

Vertailtaessa esimerkiksi tässä työssä käytetyn validointitutkimuksen tuloksia muissa tutkimuksissa saavutettuihin tuloksiin voidaan päätellä, että Autodesk CFD ei luultavasti ole optimaalinen työkalu junatunnelin virtauskenttien tarkkaan arviointiin. Tästä syystä esimerkiksi tarkkojen nopeus- tai painearvojen mitoittaminen työkalulla ei ole kannattavaa ja siksi tuloksien arvioimisessa on keskitytty enemmän virtausilmiöihin kuin tarkkoihin kvantitatiivisiin arvoihin. Yksi merkittävä heikkous Autodesk CFD:ssä on hilan luomiseen tarjolla olevat työkalut. Manuaalisesti luotu hila johtaa helposti suuriin kokoeroihin vierekkäisten koppien välillä. Eniten tämä korostuu rajakerroksen reunalla, jossa olisi ollut hyvä saada sulavampi siirtyvyys muun alueen koppeihin, mutta koppien määrää ei ollut mahdollista lisätä, koska se vaikutti heikentävästi simulaatioiden vakauteen. Lisäksi liikkuvalla junalla olisi hyvä pystyä luomaan samanlainen tarkka rajakerros kuin tunnelin seinämällä.

Simulaatioissa ei huomioitu tunnelin kaltevuutta ja siitä syntyvää painovoimaista virtausta. Yksiulotteisissa simulaatioissa painovoimainen virtaus oli huomioitu mutta kolmiulotteisiin simulaatioihin oli hankala määrittää reunaehdot, jotka luotettavasti johtaisivat esimerkiksi sellaiseen ilmiöön, jossa kylmä ilma virtaa kohti tunnelia sen lattialla ja lämmin ilma pois tunnelista sen katossa. Simulaatioissa tarkasteltiin tilanteita, joissa junien vaikutus virtauskenttään on luultavasti huomattavasti suurempi, eikä kerrostumista ole niin paljon. Toisaalta jos tarkasteltaisiin esimerkiksi yöajan virtausolosuhteita, olisi kerrostuminen varmasti merkittävä osa realistista virtauskenttää. Kerrostumisesta aiheutuva ilman virtaaminen ei haluttuun suuntaan voidaan lisäksi luultavasti välttää, kun varmistetaan, että ilman nopeus tunnelissa on yli  $3 \text{ m/s}$  samalla tavoin kuin savunpoistotilanteissa, jolloin riittävällä ilman nopeudella vältetään savun takaisinvirtaus.

Simulaatioissa mallinnettiin liikkuva juna kulkemaan virtausalueen reunojen läpi, joka aiheutti ongelmia realististen reunaehtojen luomisessa. Ongelman voisi välttää kasvattamalla laskenta-alueen kokoa niin, että juna aloittaa tunnelin sisältä ja kiihdyttää maksiminopeuteen riittävän matkan päässä ennen tuplatunnelia. Kasvaneen laskenta-alueen koko voi kuitenkin johtaa siihen, että simulaatioissa jouduttaisiin käyttämään pienoismallia, jos täysikokoisen pidemmän tunnelin mallintamiseen ei ole riittävästi laskentaresursseja. pidempi tunneli mahdollistaisi toisaalta myös esimerkiksi impulssipuhaltimen lisäämisen ja junan kiihdyttäminen poistaisi tarpeen erillisille ajassa muuttumattomille iteroinneille simulaation alussa.

Vaikka ilman virtaus kahden tunnelin välillä ohjailtaisiin optimaalisesti käyttämällä erillistä ilmanvaihtotekniikka järkevästi pakkasilmaa virtaa sisään ja lämmintä ilmaa ulos junien kulkiessa suuaukon läpi. Lisäksi kylmää ilmaa virtaa asemien läheisyydessä sijaitsevien paineentasauskuilujen kautta. Tunnelin suunnittelussa voisi olla mielenkiintoista tutkia lisää onko paineentasauskuilujen kohdalla mahdollista käyttää hyväksi samanlaista kiertoilmiötä kuin tuplatunnelin alussa, mutta vaikka tämä olisi mahdollista ja sillä parannettaisiin tunnelin energiatehokkuutta niin viimekädessä varmin tapa ehkäistä pakkasilman aiheuttama jäätyminen tunnelissa on varmasti siellä sijaitsevien teknisten laitteiden ja rakenteiden riittävä eristäminen niistä paikoista, joissa jäätymisriski on olemassa.

## 8 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin Helsinkiin sijoittuvaan Pisararata nimisen joukkoliikennejärjestelmän tunnelin suuaukon virtausolosuhteita. Työssä hyödynnettiin aikaisemmista yksiulotteisista simulaatioista peräisin olevia lähtötietoja ja mallinnettiin tunnelin toisen suuaukon tuplarataosuus kolmiulotteisesti Autodesk CFD -ohjelmistolla.

Työn tavoitteina oli selvittää ja eritellä junatunneleiden LVI-suunnittelun erityispiirteet erityisesti tunnelin jäätyksen näkökulmasta ja tunneleiden kolmiulotteiseen virtausmallinnukseen vaadittava teoria. Työssä mallinnettiin Pisararadan tunnelin suuaukon virtausolosuhteita. Tavoitteena oli tutkia kolmiulotteisen virtausmallinnuksen soveltuvuutta junatunnelin LVI-suunnittelijan työkaluksi ja millaisia haasteita junatunnelin suuaukon virtausmallinnuksessa on. Työn kaksi ensimmäistä tavoitetta täytettiin junatunneleita ja virtauslaskennan metodiikkaa käsittelevien kirjallisuuskatsauksien avulla. Virtausmallinnuksen tutkimusmetodiikkana oli Autodesk CFD:llä tehtyjen kolmiulotteiset virtaussimulaatiot, joiden avulla täytettiin työn loput tavoitteet.

Työn tutkimuskysymyksenä oli selvittää kiertääkö lämmin ilma kahden yksittäisen tunnelin välillä tuplaratatunnelin kohdalla. Tutkimuskysymys ratkaistiin tunnistamalla lähtötiedoista merkitykselliset simuloitavat tilanteet ja simuloimalla ne kolmiulotteisesti sekä arvioimalla simulaatioiden merkitys todelliseen tilanteeseen verrattuna.

Junatunnelin LVI-suunnittelun erityishaasteet verrattuna tavallisiin kiinteistöihin liittyvät vahvasti tunnelin käyttötarkoitukseen. Joukkoliikennejärjestelmät kuljettavat suuria määriä ihmisiä, joiden turvallisuus on taattava myös onnettomuustilanteissa, jotka voivat esimerkiksi hätäpoistumisteiden kannalta olla paljon haastavampia kuin tavanomaisissa kiinteistöissä. Tästä syystä tunneleiden palonsammutus ja savunpoisto ovat erityisen tärkeitä teknisiä järjestelmiä. Maanalaisten tunneleiden perusvesien hallintaan on myös kiinnitettävä erityistä huomiota. Tunneleihin vuotaa kallion rakoja läpi perusvettä, joka voi aiheuttaa tulvimista sekä jäätyessään vahingoittaa myös tunnelin rakenteita. Tunnelin ilmanvaihdossa erityishuomiota vaatii junien aiheuttamien paineiskujen tasaaminen paineentasauskuilujen avulla sekä junan ja kiskoja välisestä hankauksesta syntyvät ilman epäpuhtaudet. Turvallisuutta takaavien teknisten järjestelmien toiminnan, tunnelin rakenteiden kestävyys sekä matkustajien viihtyvyyden kannalta myös tunneleiden lämpötilaolosuhteidenhallinta ja tässä työssä erityisesti huomioitu jäätyksen estäminen on otettava huomioon junatunnelin suunnittelussa.

Suurin lämpöhäviö tunneliin syntyy ulkoilmaan rajoittuvien suuaukkojen ja paineentasauskuilujen kautta. Kylmää ilmaa virtaa liikkuvan junan aiheuttaman mäntäilmiön vaikutuksesta ja painovoimaisesti raskaan kylmän ilman pyrkiessä syrjäyttämään tunnelissa lämminneen ilman. Lähtökohtaisesti virtausnopeudet määräytyvät tunnelin ja kuilujen dimensioiden, junan ja tunnelin poikkipinta-alojen suhteen, junan nopeuden ja kulkutiheyden sekä tunnelin ja ympäristön lämpötilaeron perusteella, mutta virtausnopeuteen voidaan vaikuttaa myös esimerkiksi tunnelin varteen sijoitetuilla impulssipuhaltimilla ja muulla ilmanvaihtotekniikalla.

Tunnelissa vallitsevat virtausilmiöt ovat monimutkaisia ja niiden selvittämiseen on maailmanlaajuisesti hyödynnetty kokeellisten tutkimusten lisäksi yksiulotteista ja kolmiulotteista numeerista virtausmallinnusta. Yksiulotteiset tarkastelut ovat tehokas tapa selvittää tunnelissa vallitsevien virtausten, painetasojen sekä lämpötilan suuruusluokkia ja vertailla erilaisia teknisten laitteiden asetuksia. Kolmiulotteiset

simulaatiot ovat raskaampia, mutta niiden avulla voidaan tarkastella tarkemmin yksityiskohtaisia tilanteita. Tarkemmat simulaatiot voivat olla hyödyllisiä esimerkiksi tunneleiden suuaukkojen, asemalaitureiden, paineentasauskuilujen sekä impulssipuhaltimien kohdalla. Toisaalta tunnelin ilmavirtaukset syntyvät koko tunnelikokonaisuuden vaikutuksesta. Siksi, jos halutaan mallintaa yksittäinen tunnelin sisäinen alue tarkemmin, on tiedettävä myös millaiset virtausolosuhteet vallitsevat mallinnettavan alueen reunoilla elleivät ne rajoitu ulkoilmaan. Tässä tilanteessa yksiulotteiset simulaatiot soveltuvat hyvin kolmiulotteisten simulaatioiden reunaehto- ja tuottamiseen.

Kolmiulotteisessa virtausmallinnuksessa mallinnettava alue jaetaan kolmiulotteiseksi hilaverkoksi, jonka solmukohdissa ratkaistaan virtausta kuvaavia taseyhtälöitä numeeristen menetelmien avulla. Virtausta kuvaavat taseyhtälöt ovat pohjimmiltaan aina samoja, mutta niihin on mahdollista tilanteesta riippuen tehdä laskentaa helpottavia oletuksia, kuten esimerkiksi ilman kokoon puristumattomuus, kun sen Mach-luku on riittävän pieni. Simulointiin käytettävissä olevat turbulenssimallit ja yhtälöiden ratkaisemiseen käytetyt numeeriset menetelmät vaihtelevat myös eri kaupallisten laskentaohjelmistojen välillä. Junatunneleiden kolmiulotteisen virtausmallinnuksen haasteita ovat reunaehto- ja selvittämisen lisäksi liikkuvan junan mallinnus, suuret mallinnettavat alueet, suuri määrä vaihtelevia tilanteita sekä riittävän kokeellisen mittaustulosten puute, jota voisi hyödyntää virtaussimulaatioiden laadun varmistamiseen.

Autodesk CFD:llä tehdyn validointitutkimuksen perusteella ohjelmisto pystyy ratkaisemaan laadullisesti junan aiheuttamat virtausilmiöt tunnelissa. Toisaalta numeeriset tulokset eivät kuitenkaan täsmänneet täysin kokeellisia mittaustuloksia eikä ohjelmistosta saatuihin nopeus ja painetasoihin sen takia kannata luottaa täysin.

Työssä Autodesk CFD -ohjelmistolla tehtyjen Pisararataan liittyvien simulaatioiden perusteella havaittiin, että pakkasilmaa virtaa sisään ja lämmintä ilmaa ulos junien kulkiessa tuplatunnelin ja suuaukon läpi. Toisaalta silloin kun yksittäisten tunnelien väliset virtausolosuhteet ovat oikeat, ilma kiertää ulkoradalta sisäradalle. Käytännössä esimerkiksi silloin kun liikkuva juna ei ole tuplatunnelissa. Ilman kiertäminen pienentää jäätymisriskiä ja kiertämisen voimakkuuteen voidaan todennäköisesti vaikuttaa ohjaamalla virtauksen voimakkuutta ilmanvaihtotekniikalla. Tunnelin jäätymisen ehkäisemiseksi suositellaan kuitenkin myös riittävän lämpöeristyksen käyttöä.

## Lähdeluettelo

Aarnio, P. (2005) 'The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM 2.5) in the Helsinki subway system', *Atmospheric Environment*, 39(28), pp. 5059-5066.

Amouzandeh, A. (2014) 'Real-scale CFD simulations of fire in single- and double-track railway tunnels of arched and rectangular shape under different ventilation conditions', *Engineering Structures*, 77, pp. 193-206.

Ampofo, F. (2011) 'Application of groundwater cooling scheme for London Underground network', *International Journal Of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 34(8), pp. 2042-2049.

Ampofo, F. (2004a) 'Underground railway environment in the UK Part 1: Review of thermal comfort', *Applied Thermal Engineering*, 24(5), pp. 611-631.

Ampofo, F. (2004b) 'Underground railway environment in the UK Part 2: Investigation of heat load', *Applied Thermal Engineering*, 24(5), pp. 633-645.

Ampofo, F. (2004c) 'Underground railway environment in the UK: Part 3: Methods of delivering cooling', *Applied Thermal Engineering*, 24(5), pp. 647-659.

ASHRAE (2011) *2011 ASHRAE handbook : heating, ventilating, and air-conditioning applications*. Inch-Pound ed edn. Atlanta, Ga.: ASHRAE.

Autodesk (2018) *Autodesk CFD 2019, Theoretical Background*. Available at: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/SimCFD-Learning/files/GUID-B737967D-DF1E-4A7E-AAED-CFD7FD41D0CD-htm.html> (Accessed: 29.1.2019).

Bickel, J.O. (1996) *Tunnel engineering handbook*. 2. ed. edn. New York [u.a.]: Chapman & Hall.

Camelli, F.E. (2014) 'Modeling subway air flow using CFD', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, pp. 20-31.

Colella, F. (2009) 'Calculation and design of tunnel ventilation systems using a two-scale modelling approach', *Building and Environment*, 44(12), pp. 2357-2367.

Cross, D. (2015) 'A validated numerical investigation of the effects of high blockage ratio and train and tunnel length upon underground railway aerodynamics', .

Gerhardt, H. (1998) 'Wind and train driven air movements in train stations', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-6, pp. 589-597.

González-Gil, A. (2014) 'A systems approach to reduce urban rail energy consumption', *Energy Conversion and Management*, 80(C), pp. 509-524.

Haack, A. (1998) 'Fire protection in traffic tunnels: General aspects and results of the EUREKA project', *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 13(4), pp. 377-381.

Hu, S. (2004) 'Influence of platform screen doors on energy consumption of the environment control system of a mass rapid transit system: case study of the Taipei MRT system', *Energy Conversion and Management*, 45(5), pp. 639-650.

Hu, Z. (2018) 'The durability of shotcrete in cold region tunnel: A review', *Construction and Building Materials*, 185, pp. 670-683.

IEA and UIC (2017) *Railway Handbook 2017*. International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/topics/transport/railwayhandbook/> (Accessed: 01.03.2019).

Incropera, F.P. (2007) *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed edn. Hoboken (NJ): Wiley.

Ingason, H., Li, Y.Z. and Löfnermark, A. (2014) *Tunnel fire dynamics*. New York: Springer.

Ji, Z. (2012) 'Classification, Causes of Tunnel Frost Damages in Cold Region and Several New Technologies to Prevent them', *Applied Mechanics and Materials*, 170-173, pp. 1504.

Juraeva, M. (2011) 'A computational analysis of the train-wind to identify the best position for the air-curtain installation', *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 99(5), pp. 554-559.

Khayrullina, A. (2015) 'CFD simulation of train aerodynamics : train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, pp. 100-110.

Kim, J.Y. and Kim, K.Y. (2009) 'Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel', *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 97(5), pp. 174-179. doi: 10.1016/j.jweia.2009.06.002.

Kim, J.Y. and Kim, K.Y. (2007) 'Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway', *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 22(2), pp. 166-172. doi: 10.1016/j.tust.2006.06.001.

Kim, M. (2012) 'Monitoring and prediction of indoor air quality (IAQ) in subway or metro systems using season dependent models', *Energy & Buildings*, 46, pp. 48-55.

Krasyuk, A.M. (2019) 'Experimental research into air distribution in a terminal subway station', *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 85, pp. 21-28.

Kundu, P.K. and Cohen, I.M. (2008) *Fluid mechanics*. 4th ed edn. Amsterdam: Academic Press.

Lai, J. (2012) *Experimental study on air temperature field for cold-region tunnel in Qinghai-Tibet Plateau: A case study*.

Li, Y. and Nielsen, P.V. (2011) 'CFD and ventilation research', *Indoor air*, 21(6), pp. 442-453. doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00723.x.

Liikennevirasto (2018) *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 18 Rautatietunnelit*, Helsinki: Liikennevirasto.

López González, M. (2014) 'Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels', *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 40, pp. 22-37.

Ma, J. (2018) 'Analyses of the improvement of subway station thermal environment in northern severe cold regions', *Building and Environment*, 143, pp. 579-590.

Martins, V. (2015) 'Exposure to airborne particulate matter in the subway system', *Science of the Total Environment*, 511(C), pp. 711-722.

Mazarrón, F.R. (2015) 'Annual evolution of the natural ventilation in an underground construction: Influence of the access tunnel and the ventilation chimney', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, pp. 188-198.

Mortada, A. (2015) 'Thermal Modeling and Parametric Analysis of Underground Rail Systems', *Energy Procedia*, 78, pp. 2262-2267.

Peyret, R. (1996) *Handbook of Computational Fluid Mechanics*. GB: Academic Press.

Popov, N. (2014) 'Improvement of shallow subway tunnel ventilation procedures', *Journal of Mining Science*, 50(5), pp. 943-952.

Rakennustietosäätiö (2006) *Infra RYL 2006 : Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset Osa 1 Väylät ja alueet*. Helsinki: Rakennustieto.

Ritola, J. (2002) 'Kalliotilojen vesitiiviyyden hallinta', *VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*, (2147), pp. 3-124.

Sørensen, D.N. and Nielsen, P.V. (2003) 'Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments', *Indoor air*, 13(1), pp. 2-17. doi: 10.1111/j.1600-0668.2003.00170.x.

Tan, X. (2013) 'Study of airflow in a cold-region tunnel using a standard  $k - \varepsilon$  turbulence model and air-rock heat transfer characteristics: validation of the CFD results', *Heat and Mass Transfer*, 49(3), pp. 327-336.

Thompson, J.A. (2006) 'Modelling low-energy cooling strategies for underground railways', *Applied Energy*, 83(10), pp. 1152-1162.

White, F.M. (2005) *Viscous fluid flow*. 3rd ed edn. Boston MA: McGraw-Hill.

- Xuefu, Z. (2002) 'Nonlinear analysis for the three-dimensional temperature fields in cold region tunnels', *Cold Regions Science and Technology*, 35(3), pp. 207-219.
- Yang, Z. (2015) 'An innovative environmental control system of subway', *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 147, pp. 120-131.
- Ympäristöministeriö. 1009/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta Available at: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171047> (Accessed: 01.03.2019).
- Zeng, Y. (2017) 'Tunnel temperature fields analysis under the couple effect of convection-conduction in cold regions', *Applied Thermal Engineering*, 120, pp. 378-392.
- Zhang, H. (2016) 'Experimental and numerical investigation of braking energy on thermal environment of underground subway station in China's northern severe cold regions', *Energy*, 116(P1), pp. 880-893.
- Zhou, X. (2016) 'Temperature field analysis of a cold-region railway tunnel considering mechanical and train-induced ventilation effects', *Applied Thermal Engineering*, 100, pp. 114-124.